

2015 年度 博士論文

一般市街地における環境情報地図と  
走行可能領域の識別に基づく  
自律移動ロボットの走行に関する研究

2016 年 3 月 16 日  
宇都宮大学大学院  
工学研究科  
システム創成工学専攻

江口 純司  
指導教員

尾崎 功一 教授

# 概要

本研究では、一般市街地における自律移動ロボットの実用化を目指し、自律移動ロボットの実証実験「つくばチャレンジ」を通じて、一般市街地におけるロボットの自律移動に関する技術構築を行った。自律移動ロボットの研究では実際に走行させることではじめて顕在化する課題が多く存在する。そのため著者はタスクを設定した上で、実環境で実験走行を繰り返しながら課題を抽出し、それらに対する技術構築を行う「タスクオリエンテッドアプローチ」に基づいて自律移動ロボットを開発した。これまでの研究から、一般市街地を走行する自律移動ロボットの開発において「自己位置・姿勢の推定」と「走行可能領域の識別」、および「走行可能領域から逸脱しない走行制御」を要件とした。また、これらの要件に対する機能を連携させる枠組みとして「環境情報地図」を構築した。以上の技術構築をつくばチャレンジで行った結果、安定して再現性の高い自律走行を実現することができた。本論文は9章より構成されており、以下に各章の内容について述べる第1章では、本研究の背景として自律移動ロボットと自動運転車を比較し、一般市街地を走行する自律移動ロボットを実現するための課題と本研究の動機と目的および研究のアプローチについて述べた。第2章では、安定した自律移動ロボットを開発するための、タスクオリエンテッドアプローチの考え方や、自律移動ロボットの実証実験「つくばチャレンジ」の目的と意義、および取り組みについて述べた。また、これまでのつくばチャレンジで実践された自律移動技術について説明し、それらに対する筆者の考えとして自律移動ロボットの要件、および環境情報地図の概念について述べた。第3章では、ロボットの車体構成、およびシステム構成と各機能について述べた。また、ロボットの制御ソフトウェアの概要について説明した。第4章では、ロボットの自己位置・姿勢の推定手法について述べた。最初にその基盤となる占有格子地図の作成手法について説明した。占有格子地図はロボットの走行軌跡上に測域センサのスキャンデータを記録することで作成されるが、走行軌跡には累積誤差が生じるため、正確な地図を作成することは難しい。著者は走行軌跡の誤差を、GPS 測位点を用いて補正し、FastSLAM の枠組みに取り込むことで形状が正確で矛盾のない占有格子地図を作成する手法を構築した。自己位置・姿勢の推定は占有格子地図と測域センサのスキャンデータの照合による Monte Carlo Localization を用いた手法を構築した。第5章では、走行可能領域を3次元測域センサおよび接触センサによって識別する手法を構築した。実環境では路面の凹凸などによるロボットの姿勢の変化によって、3次元測域センサによる高さの計測では10[cm]以下の低い縁石や段差を識別することは難しい。そのため、著者は識別の対象となる低い縁石や段差に対して、3次元測域センサによって地面をセンシングしたときの各測距点の水平距離による識別

手法を構築した。また接触センサでは、低い段差を駆動輪の電流値の変化から抽出する手法を構築した。第6章では、ロボットが経路を逸脱しないようにするため、著者は本研究においてロボットの経路上で検知した対象に対しては追従走行することとした。そのため、対象までの到達時間を一定に維持する速度制御手法を構築した。また、経路上にない対象に対しては走行可能領域を識別して回避する走行制御手法を用いた。その結果、走行可能領域の逸脱を抑制し、安定した自律走行が継続できることを示した。第7章では、自律走行のデータベースとして、走行禁止領域、低所特徴、経路を占有格子地図に重ねた階層構造の地図として構成した。これを用いることで、自己位置・姿勢推定の安定性向上と外界センサでは識別できない袋小路領域や駐輪場などの走行禁止・不可能領域を回避できることを示した。第8章では、つくばチャレンジ2013から2015までの実験走行において、本研究の有効性と課題について考察した。自己位置・姿勢の推定については、従来はランドマークが少ない場所では地図とのマッチングが正確にできない可能性があり、その場合には姿勢の推定精度が低下する問題があった。これに対して本研究では3次元測域センサによって歩道と芝生の境界を識別し、それらを低所特徴として占有格子地図とのマッチングに用いることで姿勢の推定精度を維持できることを示した。走行の安定性については、走行可能領域の識別精度が向上したこと、および走行可能領域から逸脱しない走行制御によってリタイヤが抑制できることを示した。以上の技術構築によってつくばチャレンジ2014および2015の課題コースを完走したことから、一般市街地で安定した自律移動ロボット技術を構築することができた。第9章では、本研究のまとめと今後の課題、および展望として本研究による自律移動ロボットの実用化への寄与について述べた。

# 目次

第1章	緒言	1
1.1	はじめに	1
1.2	背景	1
1.2.1	自律移動ロボットの実用化	2
1.2.2	自動運転車との比較	3
1.3	一般市街地における自律移動ロボット	3
1.3.1	基本的な自己位置・姿勢の推定手法	3
1.3.2	地図情報に基づく自己位置・姿勢の推定	4
	ランドマークの定義	4
	ランドマーク地図とのマッチング	4
	GPSを用いたマップマッチング	5
	占有格子地図とのマッチング	5
1.4	研究の動機と目的	5
1.5	本論文の構成	6
第2章	タスクオリエンテッドアプローチとしての つくばチャレンジ	8
2.1	はじめに	8
2.2	タスクオリエンテッドアプローチ	8
2.2.1	概要	8
2.2.2	評価の観点	9
2.3	つくばチャレンジ	10
2.3.1	概要	11
2.3.2	社会的意義	12
2.3.3	参加チーム	13
2.3.4	ロボットに求められる条件	13
2.3.5	環境条件	15
2.3.6	実験走行会	15
2.3.7	安全のための遵守事項	15
2.3.8	領域の探索	16



2.3.9	つくばチャレンジ 2015 の課題コース . . . . .	20
	ランドマークが少ない, 開けた場所 . . . . .	20
	高い建物に囲まれた場所 . . . . .	20
	歩行者や自転車の往来が多い歩道 . . . . .	20
	探索領域と街路樹周囲の縁石 . . . . .	21
	路面に凹凸が多く, 比較的狭い歩道 . . . . .	21
	横断歩道 . . . . .	21
	一般歩道 . . . . .	22
	ゴール地点 . . . . .	22
2.3.10	つくばチャレンジと一般市街地環境 . . . . .	22
2.4	これまでの研究 . . . . .	22
2.4.1	自己位置・姿勢の推定に基づく走行制御手法 . . . . .	23
2.4.2	絶対位置の測位による手法 . . . . .	23
2.4.3	環境中の相対位置の推定による手法 . . . . .	23
2.4.4	道路形状の識別による道なり走行 . . . . .	24
2.4.5	DGPS によるウェイポイント追従走行 . . . . .	25
2.5	自律移動ロボットの要件 . . . . .	26
2.6	本研究のアプローチ . . . . .	28
2.7	まとめ . . . . .	29
<b>第 3 章</b>	<b>自律移動ロボットの構成</b>	<b>30</b>
3.1	はじめに . . . . .	30
3.2	車体構成 . . . . .	30
3.3	外界センサのレイアウト . . . . .	31
3.3.1	2 次元測域センサ . . . . .	31
3.3.2	3 次元測域センサ . . . . .	34
3.4	DGPS 測位 . . . . .	34
3.5	システム構成 . . . . .	35
3.5.1	制御マイコンの機能 . . . . .	35
	ジャイロオドメトリ . . . . .	35
	駆動輪のモータ制御 . . . . .	36
	接触センサ . . . . .	37
3.5.2	ソフトウェア . . . . .	37
3.6	まとめ . . . . .	38

<b>第4章</b>	<b>外乱に強く、高精度で再現性の高い自己位置・姿勢の推定</b>	<b>39</b>
4.1	はじめに	39
4.2	占有格子地図の作成	40
4.2.1	占有格子地図の作成手法の検討	40
	絶対的な位置の基準を用いない手法	40
	絶対的な位置の基準を用いる手法	41
4.2.2	本研究のアプローチ	41
4.3	DGPS 高精度測位点の抽出	41
4.3.1	アプローチ	41
4.3.2	抽出手法	42
4.3.3	DGPS 高精度測位点に基づく占有格子地図	43
4.4	走行軌跡の推定	46
4.4.1	パーティクルフィルタの走行モデル	48
4.4.2	DGPS 高精度測位点による評価	48
4.4.3	マッチングによる評価	48
4.4.4	リサンプリング	49
4.5	占有格子地図の作成実験	49
4.5.1	実験コースの設定	49
	ジャイロオドメトリによる走行軌跡	50
	DGPS 高精度測位点	51
4.5.2	DGPS 高精度測位点の評価で作成した地図	51
4.5.3	DGPS 高精度測位点とマッチングの評価により作成した地図	52
4.5.4	コーナーでのリサンプリングにより作成した地図	53
4.5.5	つくばチャレンジ 2014 の課題コース	53
4.6	自己位置・姿勢の推定の評価実験	55
4.6.1	安定性の評価	57
	自己位置・姿勢の推定の破綻	57
	自己位置・姿勢の推定の安定性に対する評価手法	57
4.6.2	実験走行	57
4.7	まとめ	59
<b>第5章</b>	<b>走行可能領域の識別</b>	<b>62</b>
5.1	はじめに	62
5.2	関連研究	63
5.3	本研究の手法	63
5.3.1	低所特徴	64

5.3.2	課題	65
5.4	非接触センサによる低所特徴の抽出	65
5.4.1	低所特徴の抽出の要件	65
5.4.2	3次元測域センサ	66
5.4.3	アプローチ	66
5.4.4	センシング手法	68
	上段差の抽出	69
	下段差の抽出	70
	平面テーブルの効果	71
5.4.5	段差の抽出手法の比較	71
5.4.6	低所特徴の抽出例	74
5.4.7	自律走行実験	76
5.5	接触センサによる低所特徴の抽出	77
5.5.1	段差の回避動作	78
5.5.2	実験	79
5.6	まとめ	80
<b>第6章</b>	<b>走行可能領域から逸脱しない走行制御</b>	<b>81</b>
6.1	はじめに	81
6.2	速度・角速度制御	81
6.2.1	アプローチ	81
6.2.2	制御目標値の算出	82
6.2.3	積分項のリセット	82
6.3	動作の設計	83
6.3.1	アプローチ	83
6.3.2	対象の位置による動作の定義	83
6.3.3	到達時間制御による追従走行	84
6.3.4	回避動作	84
6.3.5	直前の物体に対する動作	85
6.3.6	行列動作	86
6.4	実験走行	86
6.5	まとめ	86
<b>第7章</b>	<b>環境情報地図の構築</b>	<b>89</b>
7.1	はじめに	89
7.2	環境情報地図の構成	90
7.2.1	ウェイポイント	90

7.2.2	低所特徴 . . . . .	92
	公園の芝生 . . . . .	93
	縁石 . . . . .	94
	歩道端 . . . . .	95
7.2.3	走行禁止領域 . . . . .	95
	走行不可能領域 . . . . .	96
7.3	環境情報地図を用いた実験走行 . . . . .	96
7.3.1	低所特徴を用いた自己位置・姿勢の推定 . . . . .	97
	外乱に対する安定性の評価 . . . . .	97
	実験走行 . . . . .	97
7.3.2	環境情報地図による回避動作 . . . . .	101
7.3.3	課題タスクとしての対象人物の探索 . . . . .	102
	対象人物の検知手法 . . . . .	103
	走行禁止領域の設定による誤検知の低減 . . . . .	103
7.4	まとめ . . . . .	104

## 第8章 一般市街地における自律実験走行の考察 106

8.1	はじめに . . . . .	106
8.2	つくばチャレンジの記録 . . . . .	106
8.2.1	記録の状況からの考察 . . . . .	108
	歩行者との関係 . . . . .	108
	コースを塞がれた場合 . . . . .	108
	自律走行の安定性 . . . . .	109
8.3	実験走行の考察 . . . . .	109
8.3.1	リタイアした事例 . . . . .	110
8.3.2	完走した事例 . . . . .	110
	走行禁止領域による探索対象人物の誤検知の低減 . . . . .	111
	走行不可能領域による回避動作 . . . . .	112
8.4	自己位置・姿勢の推定の考察 . . . . .	113
8.5	他のロボットとの関係の考察 . . . . .	115
8.5.1	成功例：対向接近してきたロボットの回避 . . . . .	115
8.5.2	失敗例：側面から接近してきたロボットに対する回避 . . . . .	117
8.5.3	横断歩道前の行列動作 . . . . .	118
	後続する対象を誤った例 . . . . .	119
	行列を維持できなかった例 . . . . .	119
8.6	雨天での走行の考察 . . . . .	119

8.7	まとめ	122
<b>第9章</b>	<b>結 言</b>	<b>124</b>
9.1	本論文のまとめ	124
9.2	課題	129
9.3	展望	129
<b>付 録 A</b>	<b>つくばチャレンジ</b>	
	(Real World Robot Challenge)	<b>132</b>
A.1	つくばチャレンジ 2007 から 2011	132
A.2	つくばチャレンジ 2013 以降	134
<b>付 録 B</b>	<b>DGPS 高精度測位点の抽出による</b>	
	<b>ジャイロの補正</b>	<b>137</b>
	<b>参考文献</b>	<b>139</b>
	<b>謝 辞</b>	<b>147</b>

# 第1章

## 緒 言

### 1.1 はじめに

著者は一般市街地における自律移動ロボットの実現を目指している。本研究において著者は、一般市街地の環境において安定して走行する自律移動ロボットの要件を提示し、自律移動ロボットの実証実験「つくばチャレンジ」を通じて技術構築を行った。一般的に自律移動ロボットの研究では、実際に走行させることではじめて顕在化する課題が多く存在する。そのため、本研究ではタスクを設定した上で実環境で実験走行を繰り返しながら課題を抽出し、それらに対する技術構築を繰り返す「タスクオリエンテッドアプローチ」によって安定した自律移動ロボットの実現を目指す。本研究では、一般市街地で安定して走行する自律移動ロボットの要件を「自己位置・姿勢の推定」と「走行可能領域の識別」、および「走行可能領域から逸脱しない走行制御」の3要件とし、リタイアに至る状況を、自律的に回避できるロボットの実現を目指した。また、これらの機能を連携させる枠組みとして、環境情報地図を構築した。以上の技術構築と有効性の検証をつくばチャレンジを通じて行った。

### 1.2 背景

著者は一般市街地において環境を認識し、自らの判断で目的地まで走行できる自律移動ロボットの実現を目指している。自律移動ロボットを実現するために構築された技術が社会に普及することによって、人は移動に関する作業を機械に任せることが可能となり、自由に使える時間が増える。場合によっては、働く時間を短縮することもできる。このように社会で働く人々のワークライフバランスを向上させることに対して、自律移動ロボット技術には多くの応用と発展が期待できる。一方で、一般論として現状では市街地や不正地などあらゆる環境に適応できる汎用的なロボットを実現することは難しい。そのためロボットの開発者は、対象とする環境やタスクによってロボットの仕様を最適化する必要がある。すなわち、ロボットのタスクを具体的に設定した上で実際にロボットシステムを構築し、ロボットを使用する環境、またはそれに近い環境で実験走行を行うことで課題を抽出する。この一連の流れによって、タスクに対して再現性高く、安定して動作するロボットを開発する。このような手法は「タスクオリエンテッドアプローチ」と呼ばれている。本研究では、このタスクオリエンテッドアプローチによって自律移動ロボットの技術構築を行った。

本章では自律移動ロボットに近い技術分野として、自動運転車の開発と自律移動ロボットを比較する。それによって自律移動ロボットに特有の問題を明確にし、これまでの研究と安

定した自律走行を実現するための課題について述べる。

### 1.2.1 自律移動ロボットの実用化

自律移動ロボット技術の一般論として、ロボットの実用化には次の課題がある。一般市街地で人の手を借りずに動作する高度な自律移動ロボットを実現するには、ロボット自身が環境における自己位置・姿勢を正確に推定して目的地までの経路上を設定する必要がある。その上でロボットが物理的に走行できる領域（以下、走行可能領域）を識別し、進行方向を決定する機能が必要となる。しかしながら、人のために作られた環境は必ずしもロボットが走行しやすいとは限らない。例えば、歩道と車道を区別するために設置された縁石の中には地面との高低差が小さいものがあり、ロボットに搭載されたセンサの種類やレイアウトによっては識別が難しい。そのため、ロボットが接触した場合、走行の継続が困難になる。このように走行の継続ができなくなった状態を本研究では「リタイア」と定義する。これまで実用化された比較的大型の自律移動ロボットは、事前に人によって設定された経路を正確に追従走行するように設計されている。そうすることで、開発者は、ロボットの走行可能領域の識別ミスによるリタイアのリスクを軽減している。例として、屋外のイベント会場の清掃を行う掃除ロボットは、事前に決められたコース、および領域の集塵清掃を行うように設計されている [1]。建物のフロアを巡回し、不審物を検知する警備ロボットも、基本的にコース上を走行することでタスクを達成するように作られている [2]。

自ら走行可能領域を識別して走行する自律移動ロボットは、これまで主に屋内環境を対象として研究開発が行われてきた。屋内はロボットにとって比較的走行が容易な環境である。床面は平面であるため物理的に走行可能であり、ロボットは壁に沿って走行することで目的地に到達することができる。常にランドマークとなる壁や棚などの設置物がロボットのセンシング範囲内にあることが多く、自己位置・姿勢の推定が、屋外と比較して容易である [3,4]。このような環境で実用化されたロボットに家庭用掃除ロボットがある。その例として iRobot 社の掃除ロボット “Roomba” は室内を塗りつぶすように走行することで集塵清掃を行う [5]。また、特に走行経路が設定されないため、家具などに接触することでその存在を検知し、方向を変えることで走行可能領域を探索している。これは一般家屋の床が平面であること、およびロボットが小型軽量で接触した対象を傷つけないことから実行できる走行手法である。

一方、一般市街地の環境には、これまでに述べた通りロボットにとって走行が困難となる状況が多くある。歩道には凹凸があり、ロボットの車輪がとられて走行制御が不安定になる場合がある。また、タイルで舗装されている路面ではロボットの駆動輪がスリップすることがあり、車輪の回転量から算出するロボットの位置・姿勢に誤差が生じる。市街地環境における歩道の境界や街路樹の保護などに用いられる低い縁石はロボットの外界センサでは地面との識別が難しいものがあり、ロボットが接触してリタイアとなる可能性がある。また、道路工事や宣伝用の看板などが不定期に設置されることが頻繁にあり、常に同じ状態が維持さ

れるとは限らない。したがって、自律移動ロボットには自ら走行可能領域を識別して経路を再設定する機能が必要となる。

### 1.2.2 自動運転車との比較

自律移動ロボットと共通する技術が多い分野として、目的地まで人が運転することなく自律的に走行する自動運転車がある。現在において多くの研究開発が行われている自動運転車は、事前に決められた経路計画にしたがって走行する [6, 7]。道路は車両のために作られた走行可能領域であることから、自動運転車が走行車線を識別できている限りリタイアする可能性が小さい。政府が進めている自動運転の実用化は、高速道路などの自動車専用道から検討されている<sup>1)</sup> [7]。自動車専用道では、歩行者の飛び出しなどの突発的な事象を考慮する必要性が小さい。カーブ区間ではその曲率が十分に大きく、レーンマークが明瞭で比較的識別しやすいことから、レーンマークの識別による車両制御が比較的容易である。また同一車線では、他の車両も自車両と同方向に動くため、注意領域を基本的に自車線の前方に限定することが可能であり、他車両の動きを「追い越し」「割り込み」などパターン化できる。さらに交通ルールが存在し、車両はこれに従って動くことから他車両の動きに対する自車両の動作の設定が比較的容易である。これに対して自律移動ロボットが対象とする一般市街地では、歩行者や自転車の移動方向はランダムであり、自動車の交通ルールほどの明確なルールがないため、安全で安定した自律走行を実現するには解決すべき課題が多い。

## 1.3 一般市街地における自律移動ロボット

一般的に自律移動ロボットは、基本的に事前に設定された経路に沿って走行するように設計される。その経路は複数の走行目標点「ウェイポイント」の列によって表現され、ロボットは常時ウェイポイントの方向に進むように進行方向を調整することで経路を追従走行する。そのため、効率を重視する工場内の搬送ロボットなどではロボットが経路の識別ができるように磁気マーカやラインが敷設されることが多い。しかし、一般市街地ではロボットのために環境に手が加えられることは期待できない。そのため、ロボットの自律走行ではウェイポイントの位置を、ロボットが認識している自己位置・姿勢から推定する手法がとられることが多い。以下に、これまでの研究例について述べる。

### 1.3.1 基本的な自己位置・姿勢の推定手法

車輪型移動ロボットの自己位置・姿勢の推定には、車輪の回転量を計算するエンコーダや姿勢を計測するジャイロなどの内界センサを使う「デッドレコニング」と、測域センサなど

<sup>1)</sup>一般道では高度な運転支援の実用化が検討されており、将来的に自動車専用道の自動運転と統合される計画である。



環境形状を計測する外界センサを使う「スターレコニング」の2通りの方法がある。デッドレコニングの実装手法として、車輪の回転量から単位時間あたりのロボットの移動量（並進速度、角速度）を算出し、その積算によってロボットの位置・姿勢を求める「オドメトリ」が一般的である<sup>2)</sup>。オドメトリには車輪径、および車輪間隔を用いるが、それらには誤差が含まれる。そのため、オドメトリから求めたロボットの走行軌跡はその累積誤差によって、走行距離が長くなるほど真値との差が大きくなる。この累積誤差を軽減する手法としてロボットの移動量のうち、角速度をジャイロから取得する「ジャイロオドメトリ」がある。しかしながらジャイロオドメトリにもジャイロのドリフト誤差などによって、車輪のみによるオドメトリよりも小さいながら累積誤差が生じる。このため、デッドレコニング単独では自己位置・姿勢を正確に推定できない。一方、スターレコニングでは外界センサで建物の外壁などのランドマークを計測して自己位置・姿勢を推定するが、ランドマークが観測できない場合は使用できない。したがって、一般的には連続的にデッドレコニングによって自己位置・姿勢の推定を行いながら、ランドマークの観測によってその累積誤差を低減することで、精度を高める方法が用いられる。

#### 1.3.2 地図情報に基づく自己位置・姿勢の推定

##### ランドマークの定義

これまでの研究において、自律移動ロボットの経路選択のための自己位置・姿勢の推定では環境の情報、すなわち地図を参照して進路を決定する手法が多くとられている。以下に地図を用いた自己位置・姿勢の推定と進路決定手法について述べる。本研究では建物の外壁やブロック塀など外界センシングによって抽出可能で、かつ自己位置・姿勢の推定に用いることのできる環境中の物体を「ランドマーク」と定義する。一般市街地における主なランドマークは、建物の外壁、ガードレール、街路樹、ブロック塀、花壇、植込み、ベンチ、フェンスなどである。

##### ランドマーク地図とのマッチング

この手法では、人手によって、ロボットが外界センサで観測できる建物の外壁やガードレールなどをランドマークとして登録した地図を作成する。ロボットの自律走行においては、センシングデータをランドマーク地図と照合することで、ランドマークとロボットの相対的な位置・姿勢を推定する。前山らは、事前に登録したランドマークに対する超音波センサによる観測データを用いて、拡張カルマンフィルタの枠組みで自己位置・姿勢を推定する手法を構築した [8]。この手法はランドマークとの距離など、次元の小さいセンサを用いた

<sup>2)</sup>オドメトリとは車輪型移動ロボットにおける車輪やステアリングの回転角度の計算から、それぞれの移動量を求め、その累積計算からロボットの位置を推定する手法の総称。

自己位置・姿勢の推定手法である。したがって、ランドマークが多い複雑な環境では、ランドマークの観測ミスなどによって自己位置・姿勢の推定精度が低下する可能性がある。

### GPS を用いたマップマッチング

一般的に地図を用いた自己位置推定は、自動車のカーナビゲーションなどの、いわゆる「マップマッチング」が用いられている [9,10]。これは GPS(Global Positioning System) 測位によって得られた地球上における絶対的な自己位置・姿勢を基準として、地図上の自己位置・姿勢を推定する手法である。一般的に、補正情報を用いない単独測位による GPS 測位精度は、周囲に建物がなくマルチパスのような精度低下がない状態で誤差が 5[m] 程度である。国内の道路の車線幅が 3.5[m] 程度であることを考慮すると、この精度では走行車線の識別には不十分であることが多い。そのため、マップマッチングでは GPS によって大まかな自己位置を推定し、自動車の車輪速度およびヨーレートから推定したデッドレコニングによる自車両の走行軌跡と、道路網をグラフ表現した地図をマッチングすることで、自車両の走行車線を推定する。

### 占有格子地図とのマッチング

カーナビゲーションの目的は道路案内であるため、自己位置・姿勢の推定精度は走行車線の推定ができる道路車線の幅程度で十分である。一方で自律移動ロボットの場合、対象とする環境が一般市街地であり、道路車線のように走行可能領域および移動方向が明確に定義されていない。したがって、環境中の建物や街路樹などのランドマークに対する相対的な位置関係によって走行経路を定義する必要がある。このため、環境中の建物などのランドマークによって占有された領域と、それ以外の非占有領域を定義した「占有格子地図」とのマッチングによって自己位置・姿勢を推定する手法が多く用いられている [11–13]。また、ランドマークの見え方はロボットのセンサの種類およびレイアウトによって異なる。したがって、占有格子地図を用いた自己位置・姿勢の推定では、開発者がロボット毎に占有格子地図を作成することが一般的である。

## 1.4 研究の動機と目的

本研究の目的は、安定した自律走行を持続できる自律移動ロボット技術の構築である。自律移動ロボットの理想的な姿は、周囲の環境をロボットのために整備することなく、自らの判断で環境を識別し、目的地まで走行することである。この観点から著者は自律移動ロボットを環境適応機械として捉えている。環境に合わせて自身の行動を最適化できる自律移動技術の構築は、移動体の知能化において本質的な課題である。それゆえ、技術構築の過程で得

た多くの関連技術を社会に還元することができる。このような動機から著者は一般市街地における自律移動ロボットの研究開発を行う。

一般的に自律移動ロボットの走行制御の基本は設定された経路の追従走行である。これには自己位置・姿勢の推定が基準となる。これに基づいて本研究では、車輪の回転量とジャイロの姿勢計測を用いたジャイロオドメトリより推定した自己位置・姿勢を基準として、外界センサデータと占有格子地図とのマッチングによって、より高精度に自己位置・姿勢を推定する手法を構築する。

また、ロボットの動作には周囲の歩行者や他のロボットからなる交通環境への影響が小さいことが求められる。そのため、ロボットの進路上の歩行者や他のロボットなどの対象に対しては減速して回避するなど、その状況で適切な動作を選択する必要がある。しかしながら、多様な事象が複合している実環境では、このような走行制御をロボットが安定して実行することは容易ではない。ロボットのいずれかの機能が不十分になったとき、リタイアの状態に陥る。したがって本研究では、実環境における自律移動ロボットの実証実験「つくばチャレンジ」[14,15]に参加し、市街地の多様な環境で自律移動ロボットの実験走行を行うことでリタイアに至る状況を分析する。それによって実用に耐え得る自律移動ロボット技術の構築を目指す。

## 1.5 本論文の構成

本論文の構成を述べる。本章では研究の背景と目的について述べた。第2章では本研究における自律移動ロボットの技術構築の場として、自律移動ロボットの実証実験「つくばチャレンジ」について述べる。第3章では実験に用いる自律移動ロボットのハードウェア構成、およびソフトウェア構成について述べる。第4章ではロボットの自己位置・姿勢の推定手法について述べる。その前半は、環境の占有格子地図の作成手法について説明する。後半で占有格子地図との測域センサのスキャンデータを用いた Monte Carlo Localization に基づく自己位置・姿勢の推定手法について述べる。第5章で走行可能領域の識別手法について説明する。本研究では、走行可能領域の識別において段差や縁石など歩道とそれ以外を区別する「低所特徴」に着目し、それらに対して非接触センサと接触センサの2通りの抽出手法を適用する。第6章では走行可能領域から逸脱しない走行制御手法について述べる。本研究では、ロボットの走行制御の基本方針を事前に設定した経路の追従走行とする。ロボットの経路上の歩行者や他のロボットに対する回避動作において、ロボットの経路から逸脱を最小限に抑えるため、ロボットの動作を、走行経路上にいる歩行者や他のロボットに対する追従制御、および静止物に対する回避動作より構成する。第7章では、本研究において構築した自己位置・姿勢の推定手法、走行可能領域の識別手法、および走行制御手法を統合し、連携させるための枠組みとして「環境情報地図」について述べる。第8章においてつくばチャレンジにおける実験走行により、本研究で構築した自律移動ロボット技術の有効性を検証する。本研

究における自律移動ロボット技術の成功した部分，失敗した部分を実例を用いて詳細に説明し，今後の課題を提示する．第9章にて本研究の結論を述べ，将来の展望および本研究による自律移動ロボットの実用化への寄与について述べる．

## 第2章

# タスクオリエンテッドアプローチとしての つくばチャレンジ

### 2.1 はじめに

一般市街地では歩行者や自転車が行き交い、路上に看板などの設置物が置かれ、環境が絶えず変化する。このような環境では、ロボットが走行することによって周囲の歩行者が影響され、それによってロボットもまた影響を受ける。このため、実環境の変化予測は容易ではない。また、市街地環境はロボットのために作られていない。そのため、人にとっては大きな問題ではないが、ロボットにはリタイアにつながる問題が隠れていることも多い。例えば、人が歩行するには支障のない歩道の境界を示す縁石は、ロボットによっては識別が難しい場合があり、ロボットが接触して動けなくなる可能性がある。このように自律移動ロボットの研究では、ロボットを実際に走行させながら問題事象を抽出することが必要となる。言い換えれば、ロボットを実際に動かさないと何が問題となるか、わからないことが多い。したがって、著者は安定した自律移動ロボットを実現するための研究は、実際にロボットを動かして問題を抽出することから始まると考えている。そのために多くの環境条件で実験を行う必要があり、そこで見つかった問題を着実に解決していくことで実用的な自律移動ロボットを実現することができる。このような実環境における自律移動ロボットの検証実験として「つくばチャレンジ」が2007年から行われており、著者は2008年より参加している。本章ではこの「つくばチャレンジ」について説明し、本研究における自律移動ロボットの研究手法について述べる。

### 2.2 タスクオリエンテッドアプローチ

#### 2.2.1 概要

一般的に工学分野の研究開発は事象をモデル化し、課題と目標値を設定して技術構築を行う方法がとられる。例として、自動車のエンジンの研究開発では、エンジン内部の燃焼をモデル化し、多様な条件下でシミュレーションを行うことでトルクや燃費などの性能を評価する [16]。それによって目的を達成するための技術構築を行う。一方、自律移動ロボットが動作の対象とする実環境は多様な事象が複合しているため、単純なモデル化が非常に難しい。ロボットの設計時には気づかれなかった問題が、実環境でロボットを動作させたときに発見されることが多い。このようにロボットの研究は、ロボットを動かしてはじめてわかることに本質的な課題が含まれるため、実環境の中で実験を繰り返しながら行う必要がある。した

がって自律移動ロボットのような実環境を対象としたシステムの研究では、具体的なタスク（作業目標）を設定し、その実現を目指すように技術構築を行う方法がとられる。すなわち実際にテストシステムを構成し、その過程でタスクを達成するために必要な要素技術を明らかにして、それらの開発を行う。この方法はタスクオリエンテッドアプローチと呼ばれ、これまでに有効性が示されている [17-19]。

タスクオリエンテッドアプローチの一例として、永谷らが移動マニピュレータによる「ドアの通り抜けを含む屋内ナビゲーションの研究」(図 2.1) から示した概念を図 2.2 に示す。この図において理想の自律移動ロボット（汎用自律移動ロボット）が頂点にあり、その下部のピラミッドは研究分野全体を示す。また、ピラミッドの底部は要素技術を表す。汎用自律移動ロボットを実現するには研究分野全体を完全にやり遂げる必要あり、現在の技術では到達できない。それに対して、タスクオリエンテッドアプローチでは具体的なタスクを設定することで必要な要素技術を抽出する。多くの場合、単純な要素技術の組み合わせではタスクの実現が難しいため、タスクに対する課題を抽出し、さらなる技術構築を行う。このような技術開発の流れを図 2.2 に示す。自律移動ロボットの開発は、タスクを十分な精度と再現性をもって達成するまで、「タスクを達成するための技術研究」と「要素技術の組み合わせによるシステム開発」を繰り返し行う。

### 2.2.2 評価の観点

一般的に要素技術研究は、目標値と実験結果の比較と考察によって評価される。実験結果に対して十分に吟味された上で研究開発者の想定にない事象は、いわゆる「発見」として扱われ、今後の研究対象となる。一方、ロボットを含むシステムの研究開発では、その動作は全て研究開発者の想定内に収めることが求められる。想定にない動きをするシステムは、実用に耐えない<sup>1)</sup>。開発者の想定を超えた挙動はシステムの誤動作と同じであり、十分な考察が必要である。その一方で想定どおりの動作は正しいシステム構築の必然的結果であるため、その考察はシステムの合理的動作を示すデータを確認する程度に留まり、多くの検証を要さない。研究段階におけるタスクオリエンテッドアプローチによって構築されたシステムは、要素技術を統合した結果であるタスクの達成度によって評価される。本研究ではタスクオリエンテッドアプローチによって自律移動ロボットを開発することから、次に述べる実環境における自律移動ロボットの実証実験「つくばチャレンジ」にてロボットの課題を抽出し、それに対する要素技術の構築、および自律走行による評価を行った。

<sup>1)</sup>実際には、このようなシステムを完全に作ることは難しいため、システムの限界を定義した上で、想定外の事象が発生した場合でも危険事象に至らないようにフェールセーフを実装する。



<http://www.roboken.iit.tsukuba.ac.jp/movie/movie-index.php?mode=research&year=1996>

図 2.1 ドアの通り抜け動作を含む自律ナビゲーション (永谷 1996)

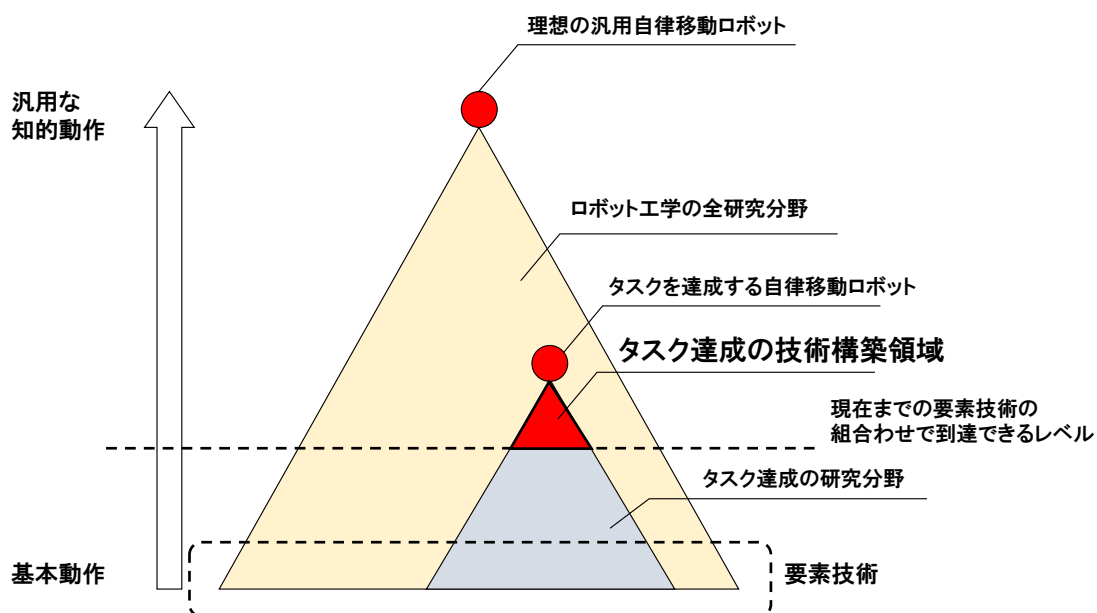


図 2.2 タスクオリエンテッドアプローチ [17]

## 2.3 つくばチャレンジ

自律移動ロボットは多くの要素技術より構成されるが、先述のとおり、それらを単に寄せ集めて繋げただけでは十分な自律走行を実現することはできない。実環境に適したシステムに近づくために、各要素技術をタスクに対して最適化する必要がある。また、各要素技術を統合して動作を構成する機能も必要となる。本研究において著者は「つくばチャレンジ」を実験場として、タスクオリエンテッドアプローチにより、実環境における自律移動ロボットの開発を行う。

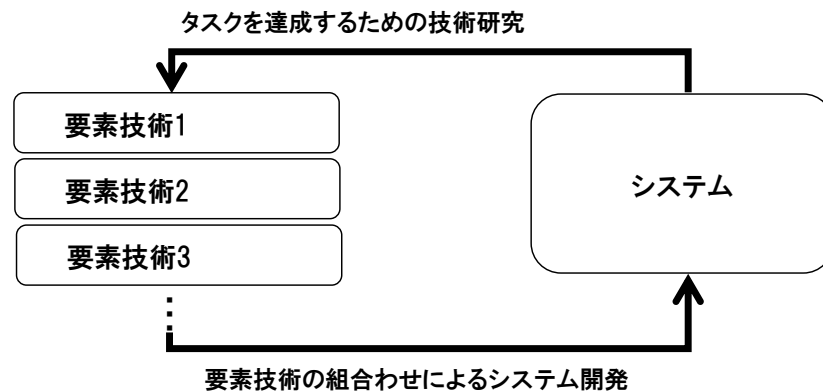


図 2.3 システム開発の流れ

### 2.3.1 概要

一般市街地における自律移動ロボットの実証実験として、2007 年より現在まで茨城県つくば市で「つくばチャレンジ」が実施されている [14,15]。つくばチャレンジでは参加チームが、2010 年までは 1[km] 程度、それ以降は 1.5[km] 程度の距離に設定された課題コースで自律移動ロボットの実験走行をおこなう。課題コースは特にロボットのために手を加えないありのままの環境として設定されている。図 2.4 にその様子を示す。ロボットはつくば市の遊歩道を、一般市民に混じって走行する。ロボットの自律走行時には随行しているチームの安全管理責任者が、ロボットの存在に気づいていない歩行者に対して必要に応じて注意喚起を促すが、危険が及ばない限りロボットは自律走行を継続する。一般市街地の環境は突発的に変化することがある。その例として図 2.5 (a) に舗装の補修工事の様子、および図 2.5 (b) にコース上にトラックが駐車されたときの様子を示す<sup>2)</sup>。ロボットはこのような状況にも対応できることが望ましい。また、図 2.5 (c) は雨が降る中でロボットが自律的に横断歩道を走行している様子を示す。雨の中で自律移動ロボットに横断歩道を渡らせる実験を行った例は少ない。つくばチャレンジは実環境における実験であるため、当然雨が降っても実験走行が行われる。一般市街地では市民との関係も考慮する必要がある。図 2.5 (d) はロボットの興味を持ち、寄ってきた市民である。このような市民に、ロボットに対して恐怖感を抱かせるようなことがあってはならない。そのため、ロボットは市民に対して安全と親和性を維持するように走行を継続する必要がある。このように実環境で初めてわかる課題を抽出し、解決することがタスクオリエンテッドアプローチであり、著者がつくばチャレンジに参加するねらいである。このように、つくばチャレンジは実環境の縮図とも言えるほど多様な条件で実験を行っている。したがって、著者はつくばチャレンジで構築した自律移動ロボットは、他の市街地でも高い安定性で自律走行できると考えている。また、つくばチャレンジは共通の課題に対して研究・開発グループが集まって行う公開実験である。課題の達成を目的とするが情報公開を前提とするため、いわゆるコンテストという競争の形式をとらない。互いに技

<sup>2)</sup> このときは、ほぼ全てのロボットがこの区間の自律走行を断念した。





図 2.4 つくばチャレンジの風景



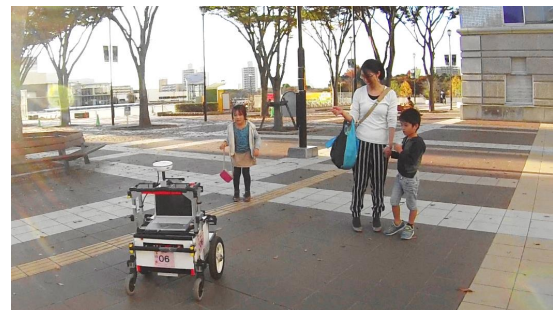
(a) 路面の補修



(b) コース上に停車している作業用車両



(c) 雨天時の横断歩道



(d) ロボットに興味を持つ市民

図 2.5 つくばチャレンジにおける多様な場面

術を見せ合い、協力しながら決められた課題を実現するロボットの技術を開発する [20].

### 2.3.2 社会的意義

著者はつくばチャレンジには大きく二つの社会的意義があると考えている。一つ目は、つくばチャレンジを通じて構築された技術に応用した製品を社会に提供することである。その例として、セニアカートなどのパーソナルモビリティに対して、環境認識および自律機能を応用して交通事故を未然に防止する予防安全機能の開発に貢献できる。また、つくばチャレンジのような難易度の高い技術開発をマネジメントできる人員の育成もこの範疇に含まれる。

二つ目は現在のロボット技術のありのままを市民に伝えることである。ロボット技術はメディアによる報道などの影響で一般市民が抱くイメージが先行し、実際のロボットと大きく乖離することがある。そのような流行の興廃は技術進化を失速させる可能性がある。つくばチャレンジを通じて、ロボットの開発の過程と実際にできることとできないことをありのままに見せることは、ロボット技術が社会に進出する過程で市民の理解を深めるために非常に効果的と考える。

### 2.3.3 参加チーム

つくばチャレンジにおける著者の参加形式は「個人参加」であるが、参加チームの大部分が大学の研究室チームである。図 2.6 に 2007 年から 2015 年までの参加チーム数とその種別を示す [20, 21]。2011 年までは企業参加チームが若干あるが、単年度の参加に留まることが多く、継続的な参加が少ない。そして 2013 年以降は、企業単独での参加がなくなっている。これについて著者は企業が多くの場合、つくばチャレンジを宣伝活動の一環として扱うことに起因すると考えている。図 2.7 に課題コースを完走したチーム数と内訳を示す。つくばチャレンジの第 1 ステージが終了した 2011 年以降、企業単独の参加はなくなっている。つくばチャレンジの課題は難易度が高いため、安定した自律移動ロボットを実現するには継続的な技術構築が必要である。そのため、単年度の参加では満足な結果が得られないことが多い。その結果、企業チームは、十分な企業宣伝効果が得られないため次年度の継続ができなくなるといったジレンマを抱えている。一方、近年では個人参加チームの活躍が目立ってきている。つくばチャレンジ 2015 の本走行では課題コースを完走した 3 チームのうち、2 チーム<sup>3)</sup>が個人参加で、残る 1 チームが大学と企業の合同チームであった。また、完走できなかったが、ゴールまで 100[m] 程度の地点まで自律走行できた個人チームもあった [22]。いずれのチームメンバーもつくばチャレンジに複数回の参加経験があり、自律移動ロボットについて経験と知見を有している。継続した技術構築においては同一のチームメンバーで継続する方が技術継承の問題も少なく、効率がよい。この点では大学の研究室チームに不利がある。大学の研究室では学生の卒業によってチームメンバーが入れ替わるため、技術の継承の不備や後継者不足があると、次年度の成績低下につながる。また、個人参加チームのメンバーの本職や専攻は著者を含めて技術関係であることが多い。つくばチャレンジの経験は、直接的ではないが、何らかの形でそれぞれの業務や学業に役立っていると考えられる。その意味でも、つくばチャレンジは社会に貢献しているといえる。

### 2.3.4 ロボットに求められる条件

つくばチャレンジにおいて、ロボットは事前に入力された情報と、センサなどの実時間で取得した環境情報に基づいて自律的に走行する。ロボットは走行開始後はゴールに到達して

<sup>3)</sup> このうち、1 チームが著者のチームであった。

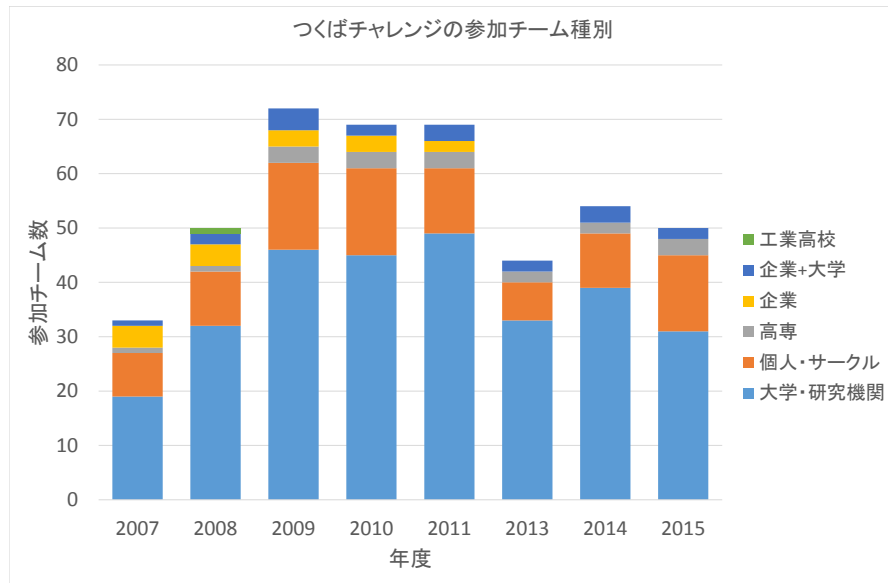


図 2.6 つくばチャレンジの参加チーム数

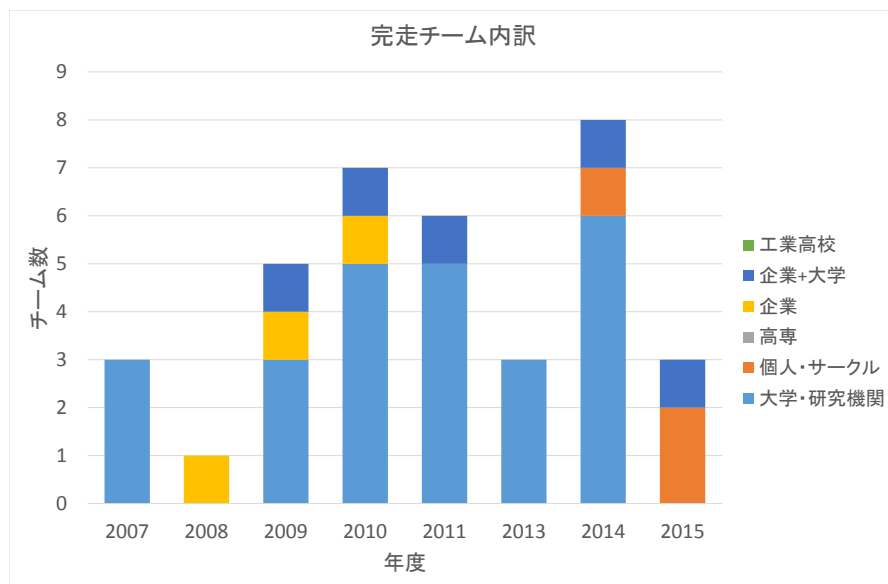


図 2.7 つくばチャレンジの完走チームの内訳

停止するまで、完全に自律的に行動することが求められる。ただし、安全確保のために指定された介入操作は除く。

### 2.3.5 環境条件

つくばチャレンジはあるがままの環境を対象としている。そのため、参加者はラインや磁気マーカなど、環境にロボットの自律走行をサポートするものを新たに敷設することはできない。GPS 衛星はロボットと関係なく存在するので GPS の使用は認められる。しかし、測位精度を向上させるための基地局の設置は認められない。同様に、公衆の Wi-fi などのネットワークの使用は認められるが、新たにルータなどのネットワーク装置を設置することはできない。クラウドのようなインターネット上の各種サービスを利用することは認められるが、開発者が新たにロボットのためのサービスをインターネット上に設置することはできない。このように、つくばチャレンジはロボットのために環境を整備することを、できる限り避けている。

### 2.3.6 実験走行会

つくばチャレンジでは 7 月から 11 月にかけて複数回の実験走行会、および成果の実証・デモンストレーションのための本走行会が設定されている。実験走行会は、2013 年および 2014 年は 9 回、2015 年は 7 回実施された。実験走行会で参加チームはつくば市の課題コースでロボットの自律走行実験を行う。ロボットの自律走行時には、ロボットの監視を担当するオペレータと、周囲の歩行者や自転車に対して注意喚起、および安全誘導を行う安全管理責任者が随行し、安全を確保する。また、実験走行会には確認走行、および記録走行の 2 種類の公式記録を取得する走行が設定されている。確認走行はロボットの走行性能を確認するための実施で、比較的安全な公園内に設定された区間の自律走行の確認を行う。この区間の自律走行を達成したロボットのみ、それより先の市街地区間の自律走行が許可される。記録走行は自律走行の公式記録を取得するための走行であり、本走行会と同一条件で行われる。

### 2.3.7 安全のための遵守事項

ロボットが人々が生活する空間で親和性を保って走行するため、参加者には以下の各項目に遵守したロボットの設計・開発が求められる。

- サイズ

ロボットのサイズは、遊歩道を歩くのに適した人間のサイズを基準とし、横幅 75[cm] 以下、長さ 120[cm] 以下、高さが 60[cm] 以上、150[cm] 以下とすること。

- 速度

ロボットの最高速度を 4[km/h] とする。試走や実験時においても 4[km/h] 以上で走行する能力は持たないこと。プログラムの暴走によっても、それ以上の速度は出ないこと。

- 重量

ロボットの最大重量は 100[kg] 以下とすること。これはロボットのベースとしてセニアカートを利用することが考慮された設定である。しかし、安全の観点から大人 2 人で持ち運べることが望ましいため、60[kg] 以下が推奨される。

- 非常停止スイッチの設置

ロボットの車体において、他者が気づきやすく、手の届きやすい場所に非常停止スイッチを設置すること。すなわち、動力源の遮断によってロボットが速やかに停止できるようにしておくこと。

- ロボットの形状

ロボットの表面には突起物や高温部の露出などがないようにすること。

以上の遵守事項について、毎回の実験走行会で安全上の問題点がないことがチェックされる。一方、ロボットの移動機構には制限がない。そのため、例えば飛行ロボットや二足歩行ロボットも参加できる。しかし、上記の高さの制限や移動の確実性を考えると車輪型が現実的である。また、ロボットのセンサの選択やモータなど、仕様に関しては特に制限はない。上記の遵守事項に従い市民の安全を脅かさない限り、参加者は自由にロボットを作って参加できる。

### 2.3.8 領域の探索

2013 年以降のつくばチャレンジでは、スタートからゴールまでの自律走行に加えて、探索行動が課題タスクとして設定された。探索対象は人であり、図 2.8 に示すとおり特定の色のベストと帽子を着用している。また、その傍らには看板が置かれている。探索領域内に一定人数の対象人物がランダムに座っており、彼らを見つけ出して 1.5[m] 以内に接近することが求められる。

この探索課題タスクの目的はロボットが自ら走行可能領域を識別し、動的に経路を設定して走行する領域の探索する機能を構築することである。これは一般的に移動ロボットに望まれるタスクのひとつである [23]。指定した領域内でロボットが自律的に経路を設定して安全に走行することができれば、ロボットの用途は大きく広がる。





図 2.8 探索対象人物

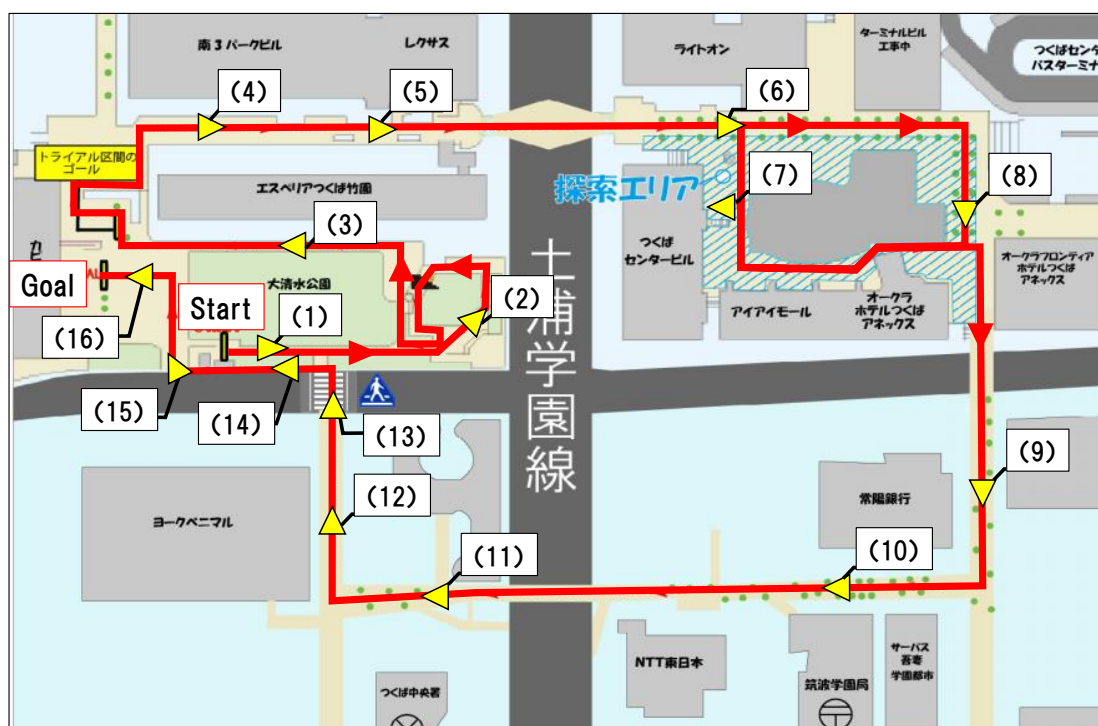
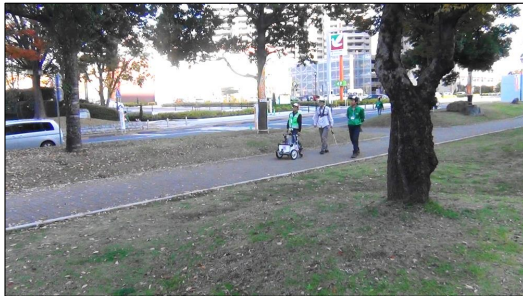
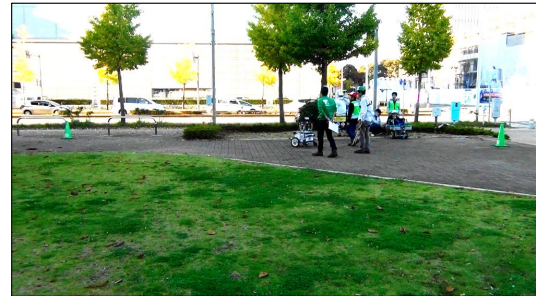


図 2.9 つくばチャレンジ 2015 の課題コース

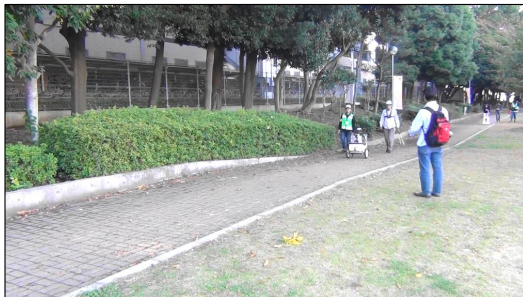
公園から一般遊歩道



(1) Startから20[m]. 歩道境界の識別が難しい.



(2) 大清水公園のランドマークが少ない区間.



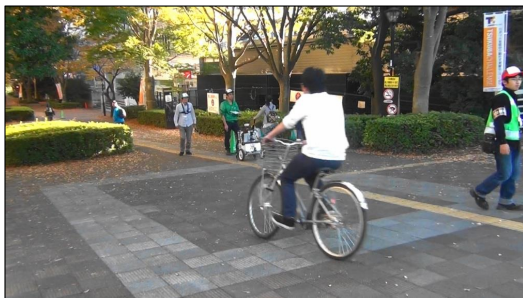
(3) 大清水公園遊歩道. 進行方向右側に高い建物があり, GPS測位精度が低下する.



(4) 一般遊歩道. 秋には落ち葉が堆積して回避対象になる.

図 2.10 つくばチャレンジ 2015 の課題コース 1

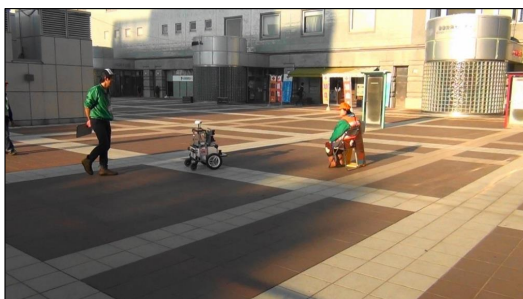
歩行者や自転車の往来が多い歩道, および探索領域



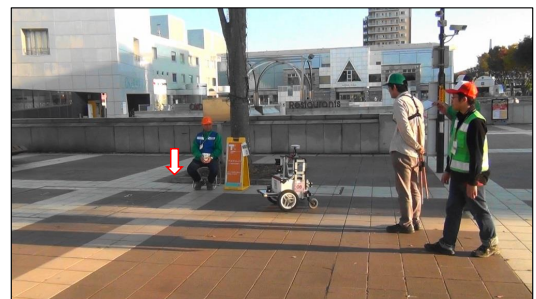
(5) 一般遊歩道. 歩行者や自転車が多い.



(6) つくばセンター. 歩行者や自転車が多い.



(7) 比較的走行が容易な探索領域.



(8) 探索領域における街路樹と縁石.

図 2.11 つくばチャレンジ 2015 の課題コース 2



路面に凹凸が多く、比較的狭い歩道



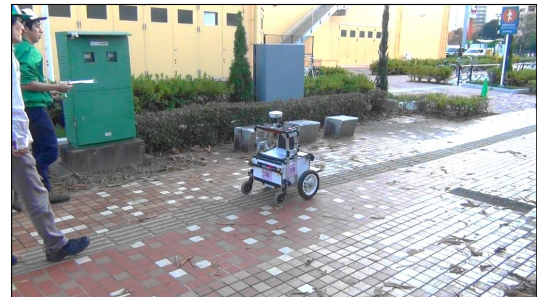
(9) 凹凸の多い歩道.



(10) 筑波学園郵便局の前. 自転車が比較的多い.



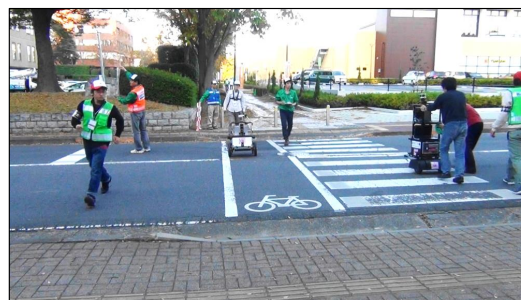
(11) 狭い歩道.



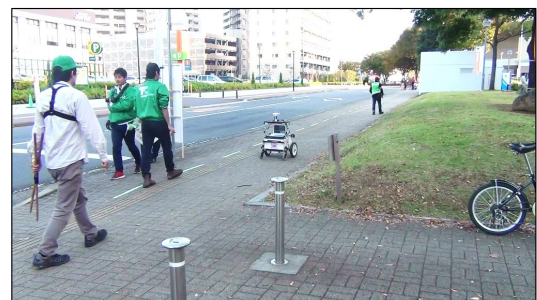
(12) スーパーマーケット付近.

図 2.12 つくばチャレンジ 2015 の課題コース 3

横断歩道、および一般歩道



(13) 横断歩道.



(14) 一般歩道. 進行方向の左側が開放されている.



(15) 車両進入止めのポール.



(16) Goal付近.

図 2.13 つくばチャレンジ 2015 の課題コース 4



### 2.3.9 つくばチャレンジ 2015 の課題コース

本研究では、課題コースにおいて共通している区間が多いこと、および人物探索のタスクが課せられたことから、主につくばチャレンジ 2013 から 2015 を考察の対象とする<sup>4)</sup>。この中でも、範囲が最も大きいつくばチャレンジ 2015 の課題コースについて、一般市街地に共通する特徴、および自律走行の問題になることについて述べる。図 2.9 に示すつくばチャレンジ 2015 の課題コースの各地点の画像を、図 2.10 から図 2.13 に示す。以下の説明では、これらの図を参照されたい。

#### ランドマークが少ない、開けた場所

スタート地点付近の図 2.10 (1) に示す場所は、芝生と歩道の境界の高低差が小さいため、ロボットがその境界を識別することは難しい。そのため自己位置・姿勢の推定誤差が生じたとき、および歩行者や他のロボットを回避したときにロボットが経路を逸脱し、芝生に進入する可能性がある。一方、ロボットの進行方向の右側には、盛り土からなる「土手」がある。一般的に土手は斜面であるため、ロボットが歩道から土手を一定の高さでセンシングした場合、垂直の壁と比較してロボットの姿勢の変化による計測距離の誤差が大きい。したがって、ロボットの自己位置・姿勢の推定に土手をランドマークとして用いた場合、精度が低下する可能性がある。また、図 2.10 (2) に示す場所の周囲にはロボットが自己位置・姿勢の推定に用いることができるランドマークが少ない。一般市街地においても、広場などでは外界センサの測距範囲内にランドマークが少ない場所が多く存在する。このように壁に囲まれた屋内と異なり、屋外環境における自己位置・姿勢の精度は、場所によって変化する。

#### 高い建物に囲まれた場所

図 2.10 (3)(4) に示す区間は、コースの近傍に高さ 40[m] 程度のマンションがある。このような高い建物の周囲における GPS 測位は、衛星からの電波が建物に反射することによって測位精度を低下させる、「マルチパス」と呼ばれる現象が発生する。このような区間で取得した GPS 測位データは精度が不安定であるため、基本的に使用することができない。したがって、一般市街地での GPS 測位では常に精度を評価し、精度が低下した測位データを棄却する必要がある。

#### 歩行者や自転車の往来が多い歩道

図 2.11 (5)(6) に示すつくば市内の遊歩道では歩行者と自転車の通行が多いため、特に安全に配慮する必要がある。ロボットが市街地を走行する場合、歩行者の回避などで急な動作

<sup>4)</sup>それぞれのつくばチャレンジの課題コースについては付録 A にて説明する。

をとると、ロボットに慣れない歩行者を驚かせ、恐怖感を与える可能性がある。それによって歩行者の動きが乱れ、ロボットがさらに回避が必要になるといった連鎖的な影響が生じ、回避動作が複雑化する可能性がある。また、市民に対してこのような体験をさせることは、将来のロボットの普及においても悪影響がある。ゆえに一般市街地においてロボットには、歩行者や自転車に対して安全性を維持した走行が求められる。

### 探索領域と街路樹周囲の縁石

図 2.11 (7)(8) は、つくばチャレンジの課題タスクとして設定された対象人物の探索領域の様子である。図 2.11 (7) は回避の対象となる設置物が少なく、ロボットが比較的容易に走行できる場所である。一方、図 2.11 (8) は街路樹と縁石が多く、対象人物に接近するために、それらを識別して回避する必要がある。一般市街地においてもこのような縁石が多く用いられている。したがって、ロボットが市街地を安定して走行するために、ロボットが縁石を識別することは重要な課題である。

### 路面に凹凸が多く、比較的狭い歩道

図 2.12 (9)(12) に示す歩道は、舗装の破れなどから、これまでのコース区間と比較して凹凸や起伏が大きい。特に図 2.12 (10) は郵便局があることから歩行者や自転車が比較的多い。また、図 2.12 (11) は狭い通路で他のロボットに遭遇した場面である。つくばチャレンジではこのように、ロボット同士の相互関係が生じる場面が頻繁に発生する。ロボットが他のロボット、および歩行者や自転車との親和性を保ちながら自律走行を継続するために、回避するか、または追従するか、最適な動作を、その環境によって選択する必要がある。

### 横断歩道

図 2.13 (13) に示す横断歩道の通過は、ロボットが一般市街地における移動範囲を拡大するために解決すべき技術課題である。つくばチャレンジ 2015 で初めて課題タスクとして設定された。これまでに一般市街地における自律移動ロボットの実証実験で、これほど大規模に自律移動ロボットに横断歩道を通過させる実験走行に取り組んだ例はない。ゆえにつくばチャレンジ 2015 では安全のため、ロボットを横断歩道の直前で停止させ、そこに待機している係員が安全を判断した上で、オペレータの操作によってロボットに自律走行を再開させるルールが設定された。そこからはロボットは横断歩道を走行するが、一般歩道の自律走行とはいくつかの点で異なる対応が必要である。ロボットが横断歩道上で他のロボットや歩行者を回避することは横断時間を長くするばかりか、横断歩道からの逸脱も起こり得るため、安全上の問題がある。しかしながら、全く回避を行わないことは、歩行者に対する安全上望ましくない。このようにロボットが安全に横断歩道を通過することには課題が多い。

### 一般歩道

横断歩道を通過した先の歩道は図 2.13 (14) に示すように、道路側にガードレールのようなランドマークがなく、開放されている。さらに、進行方向の左側では土手であるため、先述のとおりこの歩道区間におけるロボットの自己位置・姿勢の推定精度が低下する。そのため、図 2.13 (15) では、コースが車両進入止めのポールの中に設定されているが、自己位置・姿勢の誤差によってポールに接触する可能性があるため、これを回避する機能が必要となる。このような一般歩道はありふれた存在であるため、つくばチャレンジで高い再現性をもって安全に自律走行できる技術を構築することは、他の一般市街地環境においても十分に通用すると考える。

### ゴール地点

図 2.13 (16) に、ゴール地点を示す。この周囲には参加チームのテントや機材が置かれている。しかしこれらは実験走行毎に設置されることから、配置と形状が異なるため、ランドマークとしての使用には向かない。また、ゴールまでの経路にロードコーンが設置される。これらの位置は、参加チームのテントと同様に実験走行毎に異なるが、経路に沿って配置されるため、ロボットの経路からの逸脱を抑制することには有用である。

### 2.3.10 つくばチャレンジと一般市街地環境

つくばチャレンジ2015の課題コースは、全長が探索行動による走行距離を除いて約1.58[km]である。一般的にロボットの自律走行は、走行距離が長くなるほどリタイヤのリスクが高くなる。つくばチャレンジの課題コースでは、これまでに述べたとおり、一般市街地でも見られる自律走行の課題が多く見つけられる。ゆえに、つくばチャレンジで安定して自律走行するロボットを開発することは、他の市街地環境でも通用するロボットの開発、および自律移動ロボット技術を構築することと等価である。以上の理由から、本研究ではつくばチャレンジの実験走行を通して、多くの市街地環境で通用する汎用的な自律移動ロボット技術を構築する。

## 2.4 これまでの研究

一般市街地における自律移動ロボットの開発において必要な要素技術を従来研究、および著者の取り組みから抽出する。以下に、これまでに研究されたロボットの自律走行手法について述べ、その利点と問題点を挙げる。

### 2.4.1 自己位置・姿勢の推定に基づく走行制御手法

### 2.4.2 絶対位置の測位による手法

絶対的な位置情報を取得する手段として、GPS 測位を用いた自己位置・姿勢の推定手法が、自動車のナビゲーションなどで広く用いられている。GPS はロボットのオドメトリと独立に自己位置を取得できるため、オドメトリの誤差を修正する目的で使用されることが多い。GPS からさらに測位精度を向上させたシステムとして、静止衛星などからの補正信号を用いて 50[cm] 程度の精度で測位する DGPS(Differential GPS) がある。DGPS 測位を用いた自己位置・姿勢の推定には、あらかじめ設定した誤差範囲内の精度を有する測位点を用いられる [24]。しかし、実際には DGPS 測位精度は環境に大きく影響される。特に周囲に高い建物が存在する環境では、電波の回折や反射によるマルチパスなどの影響によって測位精度が低下してしまう問題がある。したがって DGPS 測位を用いて自律走行するには、常に測位精度を評価する必要がある [25-27]。竹内らはコース周辺の建物などの 3 次元地形情報を用いる手法を提案した [28,29]。すなわち、ロボットの現在位置からの GPS 衛星の可視性が判別され、不可視衛星からの信号を含む測位値が棄却される。これによって人工衛星からの電波が反射するマルチパスによって測位精度が低下することが未然に抑制され、測位精度が高く維持される。また、北村らは直接的に GPS 衛星の可視性を判別する手法を提案した [30]。この手法では赤外線カメラによって撮影された全天画像から障害物領域と空領域が判別される。障害物領域にある衛星からの信号を用いた測位値が棄却されることで GPS の測位精度が維持される。これらの手法は周囲の環境をセンシングする必要があり、そのためにシステムが大型化、および複雑化する問題がある。

### 2.4.3 環境中の相対位置の推定による手法

ロボットが走行中に環境中の建物の外壁や街路樹などのランドマークを観測し、拡張カルマンフィルタの枠組みで自己位置・姿勢を推定する手法が従来より用いられている [8]。近年では占有格子地図に対して自律走行時のスキャンデータをマッチングさせて環境中の相対的な自己位置・姿勢を推定する手法が、精度とその再現性が高いことから多くの自律移動ロボットで用いられている [31-37]。この占有格子地図の作成の課題は、正確な形状でランドマークに矛盾がない地図を作成することである。一般的にロボットの走行軌跡は累積誤差が生じる。このため、単に走行軌跡に沿って測域センサのスキャンデータをプロットしたのみでは形状が正確な地図を作成することは難しい。特にループ形状の走行経路に対して往路と復路など、複数の場所で観測した同一のランドマークを一致させて同一の占有格子として表現することが課題である。これを本研究では「閉ループ問題」と呼ぶ。吉田らはオドメトリとジャイロを組み合わせたジャイロオドメトリを用いて非常に正確な走行軌跡を取得し、走行中に取得した測域センサのデータを走行軌跡上に描画することで、とくに閉ループ問題を

考慮せずにループが閉じた占有格子地図を作成した [38]. しかし, ジャイロには温度変化などによるドリフト誤差が生じるため, ジャイロの状態によっては閉ループ問題が解決できない場合がある. 富沢らは, ランドマークではなく, 環境に対して測域センサのレーザビームが貫通したかどうかを評価する自由空間の観測モデルを用いた自己位置・姿勢の推定手法を提案した [39, 40]. この手法では未知の障害物に対して頑強な自己位置・姿勢の推定が可能である. 一方で, 出来上がる地図は人の視覚とは異なった表現になるため, 人が地図上で経路を修正したり, 環境情報を追加することが難しい. また, 経路を変更する毎に地図を作り直すのではなく, 地図の再利用性が低い.

占有格子地図と測域センサのスキャンデータのマッチングは, 人ごみなど地図にないものと地図上のランドマークを誤ってマッチングした場合, 自己位置・姿勢の推定に誤差が生じる. 伊達らはつくばチャレンジ 2009 においてスタート地点周辺でロボットが観客に囲まれたため, 観客のスキャンデータと出発地点周辺のゲートに誤マッチングした結果, 自己位置・姿勢の推定が破綻したことを報告している [41]. 山田らはこのような人ごみに囲まれる問題を回避するため, 人ごみの影響を受けない高さ 3[m] 以上の樹木や建物の外壁などの「高所特徴」の占有格子地図を作成した [42]. しかし, 一般遊歩道における高所特徴には街路樹が含まれ, 季節によって落葉などで形状が変化するため, 定期的に地図を作り直す必要がある. このように占有格子地図とのマッチングによる自己位置・姿勢の推定は, 一度破綻すると復帰が非常に難しい. しかしながら比較的単純なシステムで高い精度が得られる手法であるため, 破綻を抑制しながら用いる必要がある.

#### 2.4.4 道路形状の識別による道なり走行

自律走行の対象とする環境の詳細な地図を持たず, 走行可能領域を識別して走行する道なり走行手法は, システムを比較的シンプルに構成できる. 大島は測域センサで走行可能領域を探索する道なり走行によって「つくばチャレンジ 2007」の課題コース 1[km] を完走した [43]. このときの課題コースはほぼ直線であり, コースの両側のフェンスや植込みで道の形状は比較的容易に識別できた (図 A.1). しかし, これ以降のつくばチャレンジでは課題コースの形状が複雑化し, ロボットには課題コースの要所で進路変更することが必要となった. 渡辺らは経路情報として距離と方位, および交差点の形状を事前情報として与え, 測域センサによって路面の路肩を抽出することで走行可能領域を識別する手法を構築した [44]. この手法では, ランドマークとなる物体が少ない開けた場所での走行が不安定になる. また, 回避行動などでセンサで識別できる範囲外に走行できない領域, いわゆる袋小路に入り込んだ場合に復帰が非常に困難となる. 齊藤らは, GPS によって大まかに自己位置を推定し, 測域センサによる走行可能領域の識別によって進路を決定する走行制御手法を構築した [45]. 道路をセンシングした測域センサのスキャンデータから道路の両端付近で直線状に並んだスキャンポイントを抽出することで道路の境界領域を識別する. この手法は道路の幅が測域セ

ンサのセンシング範囲内の場合に有効である．一方で広く開けた広場のような場所では道路端の抽出ができない．その結果，自己位置の推定誤差によって目標としていた経路から逸脱し，識別できなかった背の低い縁石などに接触してリタイアする可能性がある．

道なり走行の成否は道路境界の識別精度に依存する．しかし一般環境では境界の識別が難しい場所が多く存在する．自己位置・姿勢の推定に依存しないことからコースを逸脱したことを判別することが難しい．さらに環境情報を持たないため，元のコースに復帰する経路を見つけることが難しい．このような問題により，つくばチャレンジでは道なり走行を採用する参加者が少なくなった．

#### 2.4.5 DGPS によるウェイポイント追従走行

著者はつくばチャレンジ 2008 から 2010 にかけて，DGPS で設定したウェイポイントによる追従走行の技術構築に取り組んだ [46]．しかしながら，コースの安定した自律走行を実現することができなかった．著者が考察した問題点について述べる．著者はつくばチャレンジ 2008 に参加した当初は汎用的な自律移動ロボットを目指した．すなわち，詳細な地図を必要とせず，大まかな経路を与えるだけでロボットが走行可能領域を識別して走行する自律移動ロボット技術の構築で，いわゆる「道なり走行」とほぼ同じである．この手法では，DGPS 測位点列から推定した姿勢でジャイロの誤差の補正を行い，DGPS 測位点を用いた自己位置の推定によって自律走行する．コースが単純な一本道で構成される場合には有効であり，つくばチャレンジ 2009 の実験走行では複数回の完走が達成できた．しかし，コースが複雑化したつくばチャレンジ 2010 では，遊歩道の交差点における進路変更などでロボットは頻繁にコースを逸脱した．図 2.14 にリタイア地点を示す．歩道の左右に壁がなく，形状が不明確な場所で発生したコースからの逸脱によってリタイアとなっている．このようなコース逸脱が発生する理由を著者は次のように考えている．図 2.15 はつくばチャレンジ 2010 の実験走行で完走できた数少ない 1 回を示す．この図において，自律走行中にロボットが認識していた走行軌跡を White 線で表し，走行後にランドマークとの相対位置関係から求めた実際の走行軌跡を Gray 線で表している．このときは走行可能領域の抽出が成功し，ゴールまで到達できた．しかし実際に認識していた走行軌跡（推定走行軌跡）は図 2.15(a) および (b) で示す区間において実際の位置と大きく異なっている．このような自己位置・姿勢の推定誤差によってコースを逸脱して袋小路領域に進入した場合，元のコースに復帰できない．コースの逸脱を抑制するためには，現場での自己位置・姿勢の推定に関してカットアンドトライによる調整が必要となり，当初目指した汎用的なロボットの実現がこの手法では現実的ではないことがわかった．したがって，本研究では基本的にコースを逸脱しないアプローチを行うこととし，2011 年以降は地図を用いた高精度な自己位置・姿勢の推定に基づく自律走行手法の構築に移行した．

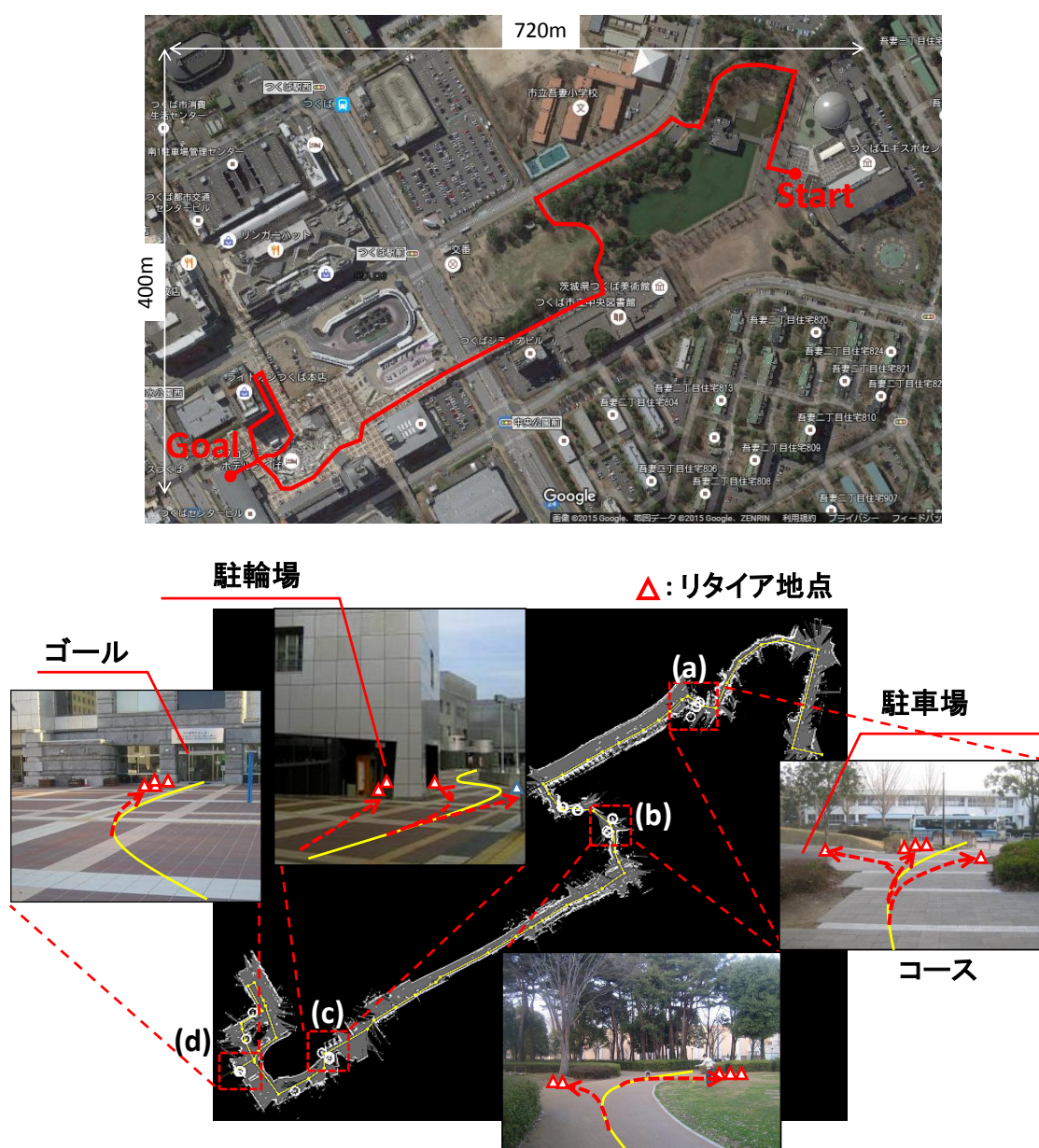


図 2.14 つくばチャレンジ 2010 の課題コースにおけるリタイア地点

## 2.5 自律移動ロボットの要件

著者は従来研究、および自律移動ロボットの実験走行より得た著者の知見から、安定した自律移動ロボットの要件を下記の3項目に整理した。

### 1. 外乱に強く、高精度で再現性の高い自己位置・姿勢推定

道なり走行ではロボットは道路に沿って走行するが、実環境の道路形状は多様である。特に経路が大きく変化する交差点の識別が重要であるが、多様な交差点形状を正確に識別することは難しい。ゆえにロボットは自己位置・姿勢を基準として事前に与えられたウェイポイントからなる経路を追従走行することで確実性の高い自律走行を目指す



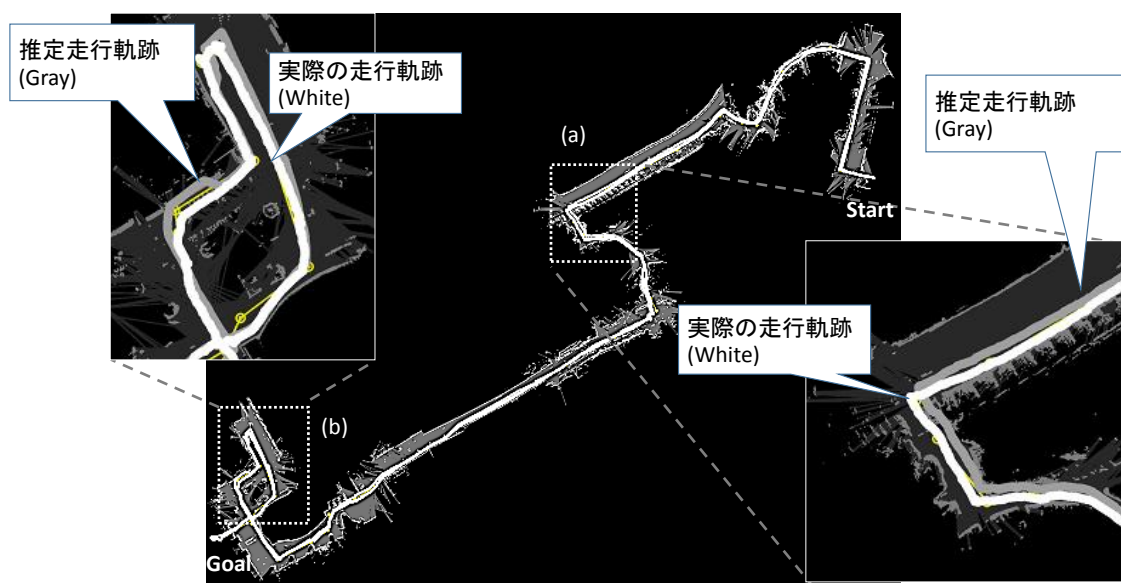


図 2.15 つくばチャレンジ 2010 の実験走行で完走できたときの走行軌跡

す。したがって、ロボットには自己位置・姿勢推定が高精度かつ再現性が高いことが求められる。この観点では、絶対位置を取得する DGPS ではマルチパスなどの環境の影響によって誤差が生じるため、自己位置・姿勢の推定の再現性を確保することが難しい。一方、占有格子地図を用いた測域センサのスキャンデータのマッチングによる環境中の相対的な自己位置・姿勢の推定では比較的高い精度と再現性が確保できる。したがって本研究では占有格子地図とのマッチングによる自己位置・姿勢の推定を用いる。

## 2. 走行可能領域の識別

自律走行を持続させるために、ロボットが物理的に走行できる領域を識別する。ロボットがリタイアする直接的な原因として、走行可能領域を十分に識別できていないことが挙げられる。自己位置・姿勢の推定精度が高く維持されていた場合でも、ロボットが歩行者や前方物体を回避した際に識別できていない低い段差に接触してリタイアとなる可能性がある。したがって、特に外界センサで見えにくい低い段差や縁石の識別が重要と考える。本研究では、縁石や段差などの比較的背の低い物体を「低所特徴」と定義する。また、環境には駐輪場などの走行できない領域を事前情報として持っておくことも安全な自律走行を実現する手段として有効であると考えられる。

## 3. 走行可能領域から逸脱しない走行制御

ロボット自身の動作によって自律走行の安定性は大きく変わる。事前に設定した経路は走行可能領域であることから、ロボットは経路を逸脱しないように走行することが基本的な動作となる。一方で、歩行者や他のロボット、および不定期に設置された看



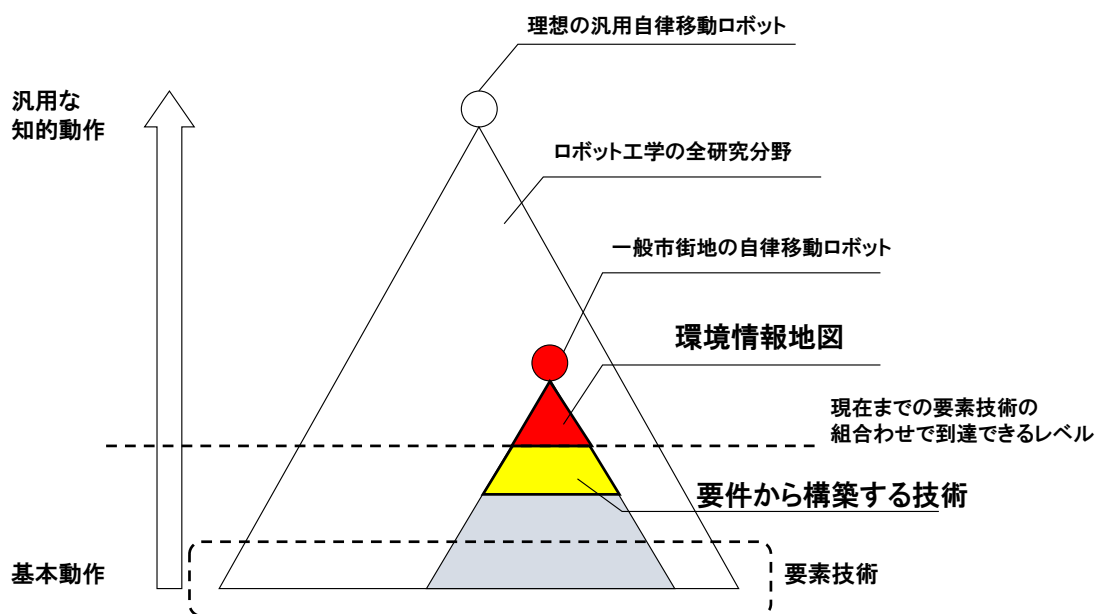


図 2.16 本研究におけるタスクオリエンテッドアプローチ

板などがロボットの経路上にある場合は回避する必要がある。このとき，識別した走行可能領域から逸脱しない走行制御が必要になる。

## 2.6 本研究のアプローチ

本研究では先に述べた自律移動ロボットの3要件に沿って技術構築を行うが、これらに基づいて構築した機能が有効に働くように、各機能を連携・統合する枠組みが必要と考える。本研究では占有格子地図をベースとし、環境情報を付加した環境情報地図を構成することによって実現することとした。タスクオリエンテッドアプローチの概念を示した図 2.2 に基づいて図 2.16 に本研究のアプローチの概念を示す。上述の3要件に基づいて構築した機能を環境情報地図を用いて連携させることで、一般市街地環境においてロボットが安定して自律走行を持続できることを目指す。

環境情報地図は占有格子地図の上に必要に応じて環境情報を階層的に付加したものであり、安定した自律走行に必要なデータベースとなる。環境情報地図には縁石や段差などの低所特徴を表す階層を付加し、ロボットが事前に走行可能領域を識別することができるようにする。また、駐輪場など物理的に走行できるが進入するとタイヤの可能性が高い領域も表現する。このように環境情報地図の作成にあたっては人の知識も用いるため、基盤となる占有格子地図は視覚的に理解できる必要がある。すなわち形状が正確で、先述の閉ループ問題を解決した、すなわち複数の視点から見た同一のランドマークに矛盾のない地図を作成する。これまでの占有格子地図は空間の占有を表現するものであった。これに対して本研究において、著者は占有格子地図に、ロボットが環境情報を取得するためのインタフェースとしての

役割を持たせた。これが本研究におけるタスクオリエンテッドアプローチにおいて、タスクを達成するために新たに構築した技術であり、環境情報地図を中心にして自律移動ロボットの3要件に対する技術構築を行った。

## 2.7 まとめ

本章では、本研究における実環境における自律移動ロボットの開発手法について述べた。自律移動ロボットの開発は、一般的な工学分野でとられる事象のモデル化による手法と比較して、対象とする実環境のモデル化が困難である。したがって、本研究において著者は具体的なタスクを設定して実環境の中で実験を繰り返しながら、そこから抽出される課題を解決する技術構築を行うタスクオリエンテッドアプローチによって自律移動ロボットを開発することとした。そして、その評価はタスクの達成度によることを述べた。このような自律移動ロボットの実験走行の場として、一般市街地における実証実験「つくばチャレンジ」の概要と意義、参加チームの種別およびロボットに求められる条件について述べた。つくばチャレンジの課題コースはロボットのために手を加えない、あるがままの環境としている。2007年から始まったつくばチャレンジで、これまでに環境実環境の縮図とも言えるほど多くの環境、多様な条件で実験が行われてきた。したがって、つくばチャレンジで安定して自律走行できるロボットは、他の市街地でも高い安定性で自律走行できることを課題コースとの比較によって示した。

本研究における自律移動ロボットの開発にあたって、これまでの研究と著者の研究を分析し、自律移動ロボットの要件を提示した。本研究における自律移動ロボット技術は、基本的に、事前に設定された経路をロボットが追従走行するアプローチをとる。ロボットの走行経路は、設定された時点では走行可能領域である。しかしながら、実環境では経路上に物体が置かれることや、歩行者や自転車が走行している場合がある。それらを回避するには走行可能領域の識別手法と、そこから逸脱しない走行制御手法が必要となる。本研究において、実環境における実験走行から設定した自律移動ロボットの3要件を以下に示す。

1. 外乱に強く、高精度で再現性の高い自己位置・姿勢推定
2. 走行可能領域の識別
3. 走行可能領域から逸脱しない走行制御

本研究では、この3要件に対して要素技術を構築し、環境情報地図によって連携させることで、一般市街地環境で安定して自律走行するロボットを実現することを目指す。

## 第3章

# 自律移動ロボットの構成

### 3.1 はじめに

本章では，本研究に用いる自律移動ロボットのシステム構成について述べる．現在，ロボットの移動機構は車輪型に加えてクローラや二足歩行，およびドローンのような飛行型など多種多様である．本研究では一般市街地における移動の確実性を考えて，最も現実的な車輪型のロボットを用いる．ロボットのシステム構成におけるハードウェアとして，外界センサには，占有格子地図とのマッチングおよび回避対象の識別に2次元測域センサ，低所特徴の識別に3次元測域センサの二種類を用いた．また，より精度の高いデッドレコニングを行うため，ロボットの姿勢計測に，オドメトリと比較して精度の高いジャイロを用いた「ジャイロオドメトリ」を実装した．一方，ソフトウェアは各機能が独立したマルチプロセスシステムとし，共有メモリを介して各プロセスでデータを共有する構成とした．本研究で用いるロボットを図3.1に示し，その諸元を表3.1に示す．以下，本研究で開発した自律移動ロボットについて説明する．

### 3.2 車体構成

一般的に車輪型の移動ロボットはベースとする台車の小回りが効くほど経路設定の自由度が高くなる．したがって本研究ではロボット台車の駆動方式を，その場で回転して進行方向を変えることが可能であることから，左右に動輪を有する独立二輪操舵(PWS)方式とした．また，踏破性の観点からロボットが一般市街地の横断歩道と歩道のつなぎ目など，ありふれた段差を乗り越えるために駆動輪を前に配置し，車輪には車輪径が大きいほど段差踏破に有利であること，および接地性とクッション性を重視して子供用自転車の12[inch]のホイールと空気タイヤを用いた．一方，ロボットの後輪は従輪であり，これについても車輪径が大きい方が段差を乗り越えるのに有利であることから，車椅子用のキャスターを用いた．また，一般的に駆動輪を前方に配置した車両構成の懸案事項として重心がロボットの前方に位置するため，坂道などで急減速した際にロボットが前方に倒れこむ可能性がある．その対策として，カウンターウェイトを兼ねた鉛シールドバッテリー（重量：2[kg]/個）をロボット後部に2個置くことで重心をロボットの後方に移動させ，前方への倒れこみを抑制する構成とした．

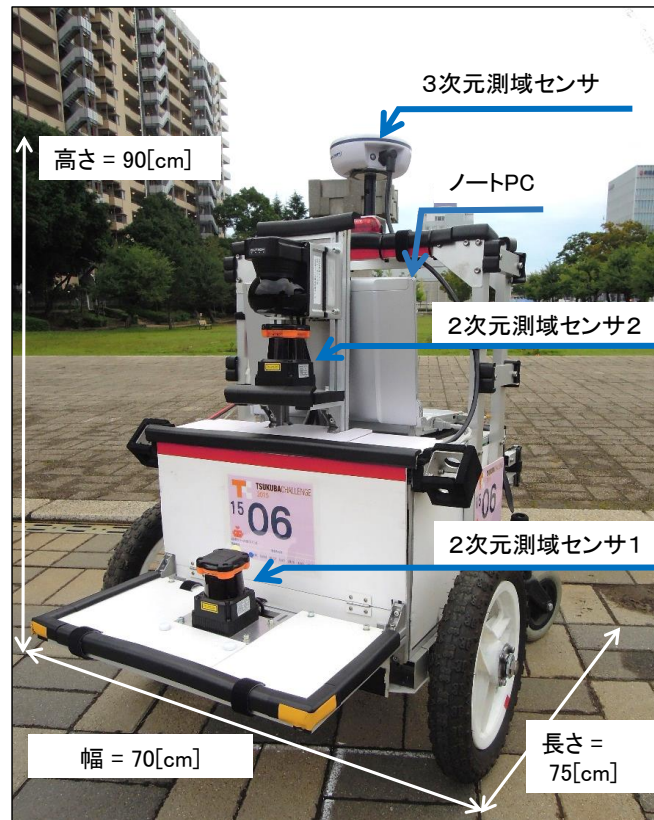


図 3.1 本研究で開発した自律移動ロボットの外観

### 3.3 外界センサのレイアウト

外界センサのレイアウトは，自律走行の環境におけるセンシングの目的と対象によって決定される．本研究における外界センシングの目的は「1. 走行可能領域の識別」，「2. 占有格子地図とのマッチングによる自己位置姿勢の推定」の二つである．このため，環境中の物体の形状データを高い精度で取得できる「測域センサ」を用いる．目的に応じたデータを取得するためには最適な位置に測域センサを配置する必要がある．また，測域センサには取得できるデータの次元から「2次元測域センサ」と「3次元測域センサ」の2種類がある．以下にそれぞれの測域センサの目的と，そのレイアウトについて述べる．

#### 3.3.1 2次元測域センサ

2次元測域センサは1本のレーザビームを水平に走査することで，環境の断面形状のスキャンデータを取得することができる．本研究で用いる2次元測域センサ（北陽電機製 UTM-30LX）は，測定範囲は270[deg]で，測定距離は最大30[m]程度である．レーザ測距点（スキャンポイント）数は1080個であり，ステップ角が0.25[deg]であることから30[m]先のスキャン点の間隔は約13[cm]となる．2次元測域センサで識別する主な対象として歩行者の

表 3.1 本研究で開発した自律移動ロボットの仕様

Size	Width=70[cm],Depth=75[cm],Height=90[cm]
Weight	25[kg]
Laptop PC	Panasonic CF-N10 CPU:CoreTM i5-2520M vPro:2.5[GHz], Mem:4[GB] OS:Linux ubuntu 12.04
Micro Computer	Alpha Project, AP-SH2F-11A(CPU:SH7136)
Gyro	Silicon Sensing Japan, CRS09-22
DGPS Receiver	Hemisphere, A100
2D-Laser Scanner	Hokuyo, UTM-30LX ×2
3D-Laser Scanner	Hokuyo, YVT-X001
Motor	Maxon, RE35 90[W] ×2
Encoder	Maxon, HEDL 5540(500[pulse])×2
Motor Driver	Hibot, H1-Axis DC Power Module×2
Battery	GS-YUASA, 12[V], 5[Ah]×2

幅が 40[cm] 程度であることから、十分に高い分解能を有する。実環境において、ロボットは経路上にある物体に対して回避することが必要であるが、現実的には電柱のように垂直方向に一樣な形状の物体ばかりではない。例として、図 3.2 (a) に示すように、ロードコーンのような円錐状の物体は、その高さによって幅が異なる。実環境ではこのような地面に近いほど幅が大きい、いわゆる「末広がり形状」の物体が存在する。このロードコーンの上部のセンシングデータによって回避を実行した場合、上部よりも幅の大きい下部に接触する可能性がある。したがって、実環境では物体の下部をセンシングの方が回避に有利である。一方、後述する自己位置・姿勢の推定において占有格子地図とスキャンデータのマッチングには、環境中の建物の外壁やブロックなどのランドマークを識別できる高さに測域センサを配置する必要がある。つくばチャレンジの環境を調査した結果、図 3.2 (b) に示す高さ 30[cm] 程度の街路樹の保護ブロックを最も背の低いランドマークとした。以上の 2 次元測域センサの設置の条件を整理すると次のようになる。

1. 確実な回避動作には、測域センサを下方に設置する方が有利
2. 高さ 30[cm] のランドマークを識別する
3. 走行に支障なきこと

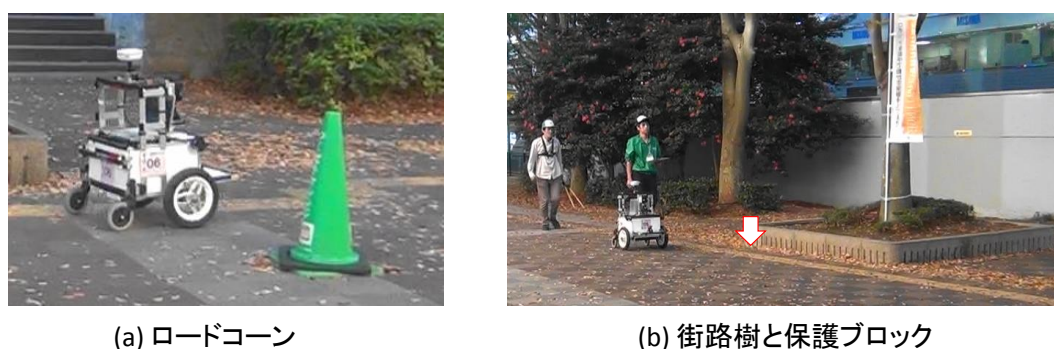


図 3.2 つくばチャレンジの環境における回避対象と背の低いランドマーク

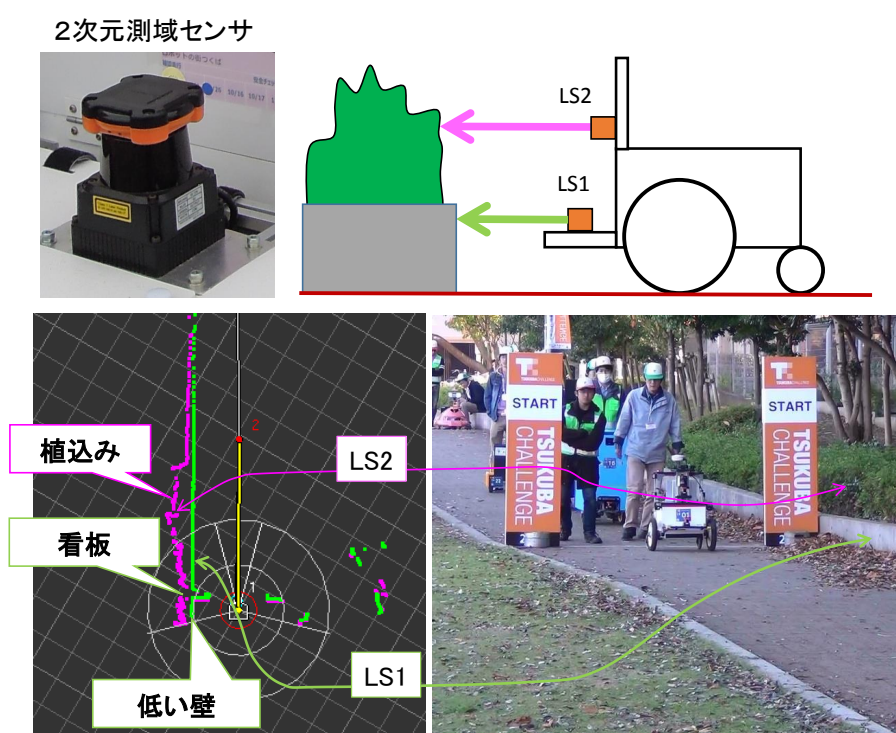


図 3.3 2次元測域センサによるセンシングの例

これらの条件を満たす設置高度を検討した結果、図 3.3 に示すように 2次元測域センサのレーザビームの高さが車輪の設置面から 25[cm] 程度の位置に 2次元測域センサ“LS1”を配置した。一方、つくばチャレンジにおける対象人物の探索のため、地面からの高さが 55[cm] 程度の位置にも 2次元測域センサ“LS2”を設置した。2次元測域センサのレーザビームの受光強度から対象人物が着用しているベスト、および看板の再帰性反射テープを検出し、対象人物の識別を行う。計算量を低減する観点から、地図とスキャンデータのマッチングによる自己位置・姿勢の推定は LS1 のみで行うが、回避対象の識別においては確実性の観点から LS2 のスキャンデータも用いる。これら二つの 2次元測域センサのスキャンデータの例を図 3.3 に示す。



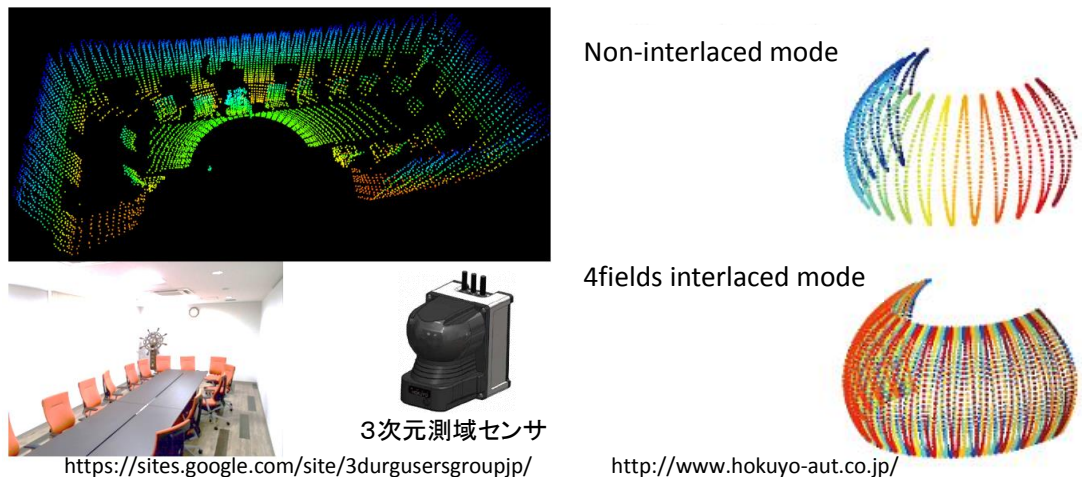


図 3.4 3次元測域センサによるセンシングの例

### 3.3.2 3次元測域センサ

本研究で用いる3次元測域センサ（北陽電機製 VT-X001）は図 3.4 に示すようにレーザービームを正弦波状に走査することで環境の3次元形状を取得する [47]。その測定範囲は水平方向に 210[deg]、垂直方向の範囲は水平面に対して -5[deg] から +35[deg] であり、測定距離は最大 25[m] 程度である。この3次元測域センサの特徴は垂直方向に分解能が高いことである。一般的な3次元測域センサは、複数のレーザービームをそれぞれ角度を変えて走査するマルチレイヤー方式で構成されている [45]。この方式は垂直方向の分解能がレーザービームの数に依存するため、分解能が高くなるほどセンサが大型化する。すなわち、小型の移動ロボット用途のものほど分解能が低く、高低差の小さい段差を抽出することが難しい。これに対して本研究で用いる北陽電機製 VT-X001 は垂直方向に十分な分解能を有し、段差の抽出に有利である。この3次元測域センサにおいて1回の走査でのスキャンポイント数は2664であるが、第4エコーまで計測することから、実質的に1回の走査で取得するスキャンポイント数は10656である。また、このセンサは環境を水平方向に密に走査するため、図 3.4 に示すように最大4インタレースまで設定できるが、データ量が4倍になり、計算負荷が大きくなる。本研究では3次元測域センサは段差の抽出による走行可能領域の識別が目的であり、比較的近距离のセンシングに留まる。このことから、本研究では1インタレースの設定で用いることとした。3次元測域センサによる走行可能領域の識別手法は第5章で述べる。3次元測域センサは高い位置に設置する方が低所特徴の抽出に有利なことから、本研究のロボットに取り付けられる最大限の高さとして 60[cm] の位置に設置した。

## 3.4 DGPS 測位

GPS は複数の人工衛星からの電波によって地球上の絶対位置を測定するシステムである。一般的な単独測位の GPS では、人工衛星からの電波が地球大気のエリ層の影響を受け、測

位精度が低下する．そのため，周囲に高い建物がなく，マルチパスの影響が小さい環境で誤差が5[m]程度である．この精度ではロボットが自律走行には十分ではない．本研究ではこのGPSに対して，静止衛星からの補正信号を用いて測位精度を向上させたDGPS(Differential Global Positioning System)を用いる．この測位誤差は50[cm]程度であり，単独測位のGPSと比較して精度が高い．しかし，このDGPS測位の精度でも自律走行でコースを走行するのには不十分であり，さらにマルチパスなどによって精度低下が発生した場合，自律走行の持続が困難になる．一方，比較的精度の高いデータを抽出することでジャイロオドメトリによる走行軌跡の累積誤差を補正することは可能である．したがって，本研究ではDGPSの測位データを占有格子地図の作成時の走行軌跡の補正に用いる．

本研究で用いるDGPS受信機(Hemisphere A100)は出力データ形式がNMEA183で，更新周期は1[Hz]である．NMEA183には緯度・経度情報の他に衛星配置，およびそれに基づく精度などのデータも出力されている．しかし，DGPSの精度は環境に依存し，特に高い建物の直下で発生するマルチパスの影響が大きい．したがって，本研究ではDGPS測位点の統計的処理により精度を評価することとし，使用するNMEA183のデータは緯度・経度を表すGGAセンテンスのみとする．

### 3.5 システム構成

本研究における自律移動ロボットのシステム構成を図3.5に示す．ロボットのシステムは台車の制御とジャイロオドメトリの算出を担当する「制御マイコン」と，各センサデータを統合し，ロボットの動作，速度，および進行方向を決定するPCから構成した．以下，それぞれの機能について説明する．

#### 3.5.1 制御マイコンの機能

ロボットの安定した走行を実現するため，その台車の制御の実行サイクルを正確に設定する必要がある．それには汎用マイコンのタイマ機能が有用である．そのため，制御を担当するマイコンとしてルネサス製SH7136が搭載されたマイコンボード(AlppaProject製AP-SH2F-11A)を用いた．制御マイコンの機能を以下に述べる．

#### ジャイロオドメトリ

制御マイコンでは，ロボットの駆動輪のDCモータに取り付けたロータリーエンコーダから取得した並進速度より移動距離，およびジャイロから取得した角速度より方位を算出する[38]．これらの算出結果を組み合わせる手法を一般にジャイロオドメトリと呼ぶ．ジャイロオドメトリは，ロボットの方位を車輪の回転量から算出するホイールオドメトリと比較して，車輪のスリップや車輪径および車輪間隔の計測誤差の影響を受けない



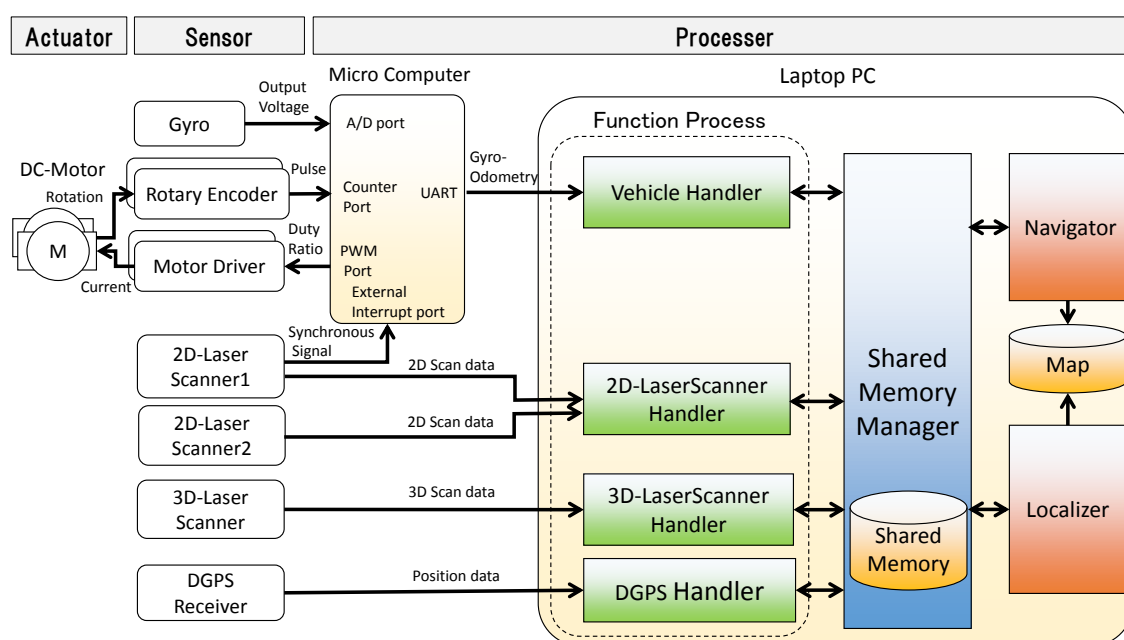


図 3.5 自律移動ロボットのシステム構成

ため精度が高い。本研究ではジャイロオドメトリより求められた走行軌跡をベースとして、PC 上のソフトウェアでより精度の高い自己位置・姿勢を推定する。

制御マイコンの CPU である SH7136 にはエンコーダのカウントを行う専用のポートがあり、左右駆動輪のエンコーダの A 相・B 相の出力がそれぞれのポートに入力される。ロボットの並進速度は、SH7136 の機能によって一定時間毎のエンコーダ値がカウントされることによって算出される。一方、本研究では角速度の取得にはジャイロ (シリコンセンシング, CRH01) を用いるが、ジャイロの出力は角速度に比例した電圧である。これを SH7136 の AD 変換ポートに入力することで整数値に変換される。SH7136 の AD 変換分解能は 12[bit] で、汎用マイコンとしては高い性能である。このようにして算出した角速度を積分することで角度、すなわちロボットの方角が算出される。ジャイロは温度によってゼロ点が変化するため、データ計測、および自律走行前は必ずゼロ点補正を行う。また、本研究ではジャイロオドメトリと 2 次元測域センサのスキャンデータと同期を取り、自己位置・姿勢の推定精度を向上させるため、2 次元測域センサの同期信号による SH7136 の外部割り込み処理によって、移動距離と姿勢のデータを PC に UART を介して送信される。

### 駆動輪のモータ制御

制御マイコンは PC から送信されるロボットの速度、角速度の制御目標値、および一時停止などの制御コマンドを受信し、左右動輪の目標角速度に展開する。そして、エンコーダから得られた各車輪の実角速度を目標値に近づけるように、PI 制御によって左右動輪の DC モータにおける PWM (Pulse Width Modulation) 制御のデューティ比を決定し、電流

制御を実行する。

#### 接触センサ

本研究のロボットでは、ロボットの動輪が環境中の物体との接触を検知する手段として、動輪の DC モータにおける電流値の変化を用いる。ロボットが走行中に環境の物体に接触した場合、動輪の負荷が大きくなるため、それまでの通常走行よりも電流値が増大する。この事象から接触を判別する。電流のモニタリングには、モータドライバ (Hibot 社製, 1Axis DC Power Module) の負荷電流フィードバック機能を用いる。負荷電流の 680/3700 が電圧としてフィードバックされ、制御マイコン SH7136 で AD 変換を行うことで数値化する。

#### 3.5.2 ソフトウェア

PC 上で動作するソフトウェアは図 3.5 に示す構成のとおり、各機能を独立したプロセスとするマルチプロセスシステムとして構成した。センサ情報を取得するハンドラ (2 次元測域センサ+ジャイロオドメトリ, 3 次元測域センサ, DGPS 測位), および, 上位機能 (行動決定, 自己位置推定) がそれぞれ独立したプロセスとして動作する。各プロセスが取得したセンサ情報, 自己位置・姿勢の推定値, 走行制御コマンドはタイムスタンプを付加して共有メモリに記録され, 全機能プロセス間で参照される [48]。このシステム構成は, 一般的にロボットの開発において頻繁に生じる, 新たな機能の追加要求に対して, ソフトウェアの機能の追加が容易であるため, システムの拡張性が高い。また, 自律移動ロボット制御のソフトウェアを図 3.6 に示す。右側 (Localizer) は事前に与えた地図とのマッチングによって自己位置・姿勢を推定している様子を示している。また, 左側 (Navigator) は周囲の環境を識別して走行目標点を設定している様子を示している。

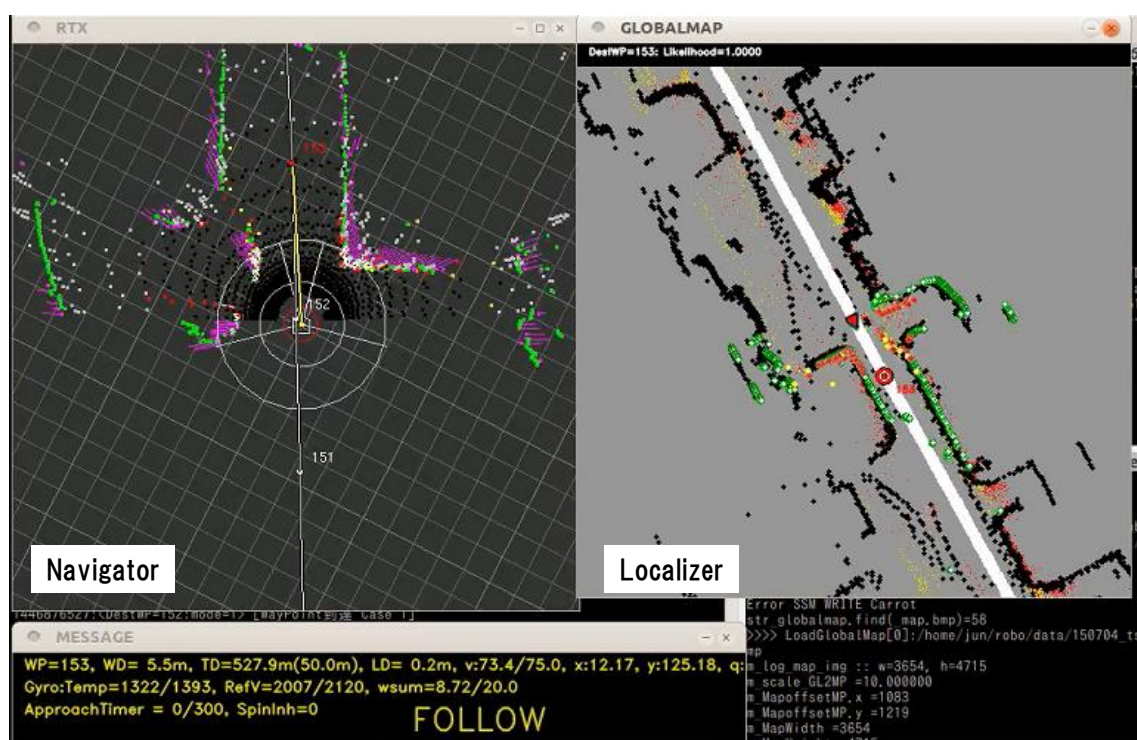


図 3.6 PC で実行されるソフトウェア

### 3.6 まとめ

本章では自律移動ロボットの車両構成，およびシステム構成と各機能について述べた．ロボットの車体は左右に独立した動輪を有する独立二輪操舵方式とし，段差の踏破性を重視して動輪を前方に配置した．また車輪は比較的大きな 12[inch] のホイールとクッション性と接地性から空気タイヤを用いた．

ロボットの外界センシングには 2 次元測域センサ 2 個，および 3 次元測域センサ 1 個を用いる構成とした．2 次元測域センサは地図とのマッチング，および進路上の回避対象の識別に用いることから下方に設置することが有利であるため，走行に支障のないことを考慮してビーム面が地面からの高さ 20[cm] となる位置に 1 個設置した．もう 1 個はつくばチャレンジの人物探索に用いるため，ビーム面の高さが地面から 55[cm] の位置に設置した．3 次元測域センサは，路面の段差などから走行可能領域の識別に用いる．このシステム構成は，新たな機能に対応するソフトウェアの追加が容易であるため，システムの拡張性に利点がある．

自律移動ロボットのシステムは，各機能を独立した機能プロセスと上位の行動決定プロセス，および自己位置・姿勢の推定プロセスより構成した．各プロセスは共有メモリを介して互いのデータを参照する．次章より，このシステムを実装した自律移動ロボットを用いて行った本研究の内容について述べる．

## 第4章

# 外乱に強く，高精度で再現性の高い自己位置・姿勢の推定

### 4.1 はじめに

一般的に自律移動ロボットは事前に設定されたコースを走行することでタスクを実行する。このため，経路の識別はロボットに求められる基本的な機能である。ロボットを走行させることが優先的に扱われる環境では，ロボットがコースの識別が容易にできるような仕組みが取り入れられる。工場における搬送ロボットの導入例では，ロボットがコースを識別するために，ラインや磁気マーカなどが床面に敷設される [49]。一方，一般市街地環境では人間が優先されることが当然であり，ロボットのために環境が改修されることは期待できない。そのため，コースを構成するウェイポイントの位置と方向は，ロボットに与える地図上の座標によって定義されることが一般的である。したがって自律移動ロボットがコース上を正確に走行するためには，ロボット自身が基準となる自己位置・姿勢を高い精度で推定する必要がある。本研究では，ロボットの自己位置・姿勢の推定手法として，建物などのランドマークによる空間の占有が表現された占有格子地図と測域センサのスキャンデータのマッチングによる手法を構築する。

占有格子地図は，環境が有限の格子で表現された地図である。ロボットが測域センサで観測したランドマークがある領域が占有格子として表され，それ以外の空間が非占有格子として表わされる。占有格子地図とのマッチングによる自己位置・姿勢の推定は，ロボットによってマッチングが正確に行われている場合には格子のサイズオーダーの精度が得られる。一方で，ロボットが環境中のランドマークを観測したときの測域センサのスキャンデータが，占有格子地図上でそれと異なるランドマークに誤マッチングされた場合，ロボットによる自己位置・姿勢の推定に誤差が生じ，ロボットがそれらを正確に推定できていた状態に戻すことが難しくなる問題がある [41]。これを本研究では「自己位置・姿勢推定の破綻」と定義する。著者は第7章で述べる環境情報地図によって，ロボットがこの問題の発生を抑制する手法を検討する。

本章では，前半で占有格子地図の作成手法について述べる。後半で占有格子地図と2次元測域センサのスキャンデータのマッチングによる自己位置・姿勢の推定手法とその評価について述べる。

## 4.2 占有格子地図の作成

占有格子地図は対象とする環境が有限の格子で分割され、それぞれの格子に対して建物などのランドマークによる占有，またはそれ以外が表現された地図である [31,51,52]．占有格子地図の表現形式は2次元地図と3次元地図があるが，3次元情報は2次元平面に投影して2次元として表現できることから，本研究では2次元の占有格子地図を扱う [32,71]．

これまでの研究から，占有格子地図の作成手法は絶対的な位置の基準を用いる手法と，用いない手法に分類される．絶対的な位置の基準を用いることで，地図上で環境の形状を正確に再現することが比較的容易になる．その一方で，絶対的な位置の基準を計測するための機能をロボットに実装する必要がある，システムが複雑化する．また，位置の基準の計測精度も評価する必要がある．それに対して絶対的な位置の基準を用いない手法は，システムが比較的単純でロボットに対してデバイスの追加が必要ないため，シンプルなシステム構成で済む利点がある．その一方で地図の範囲が大きくなるほど正確な地図を作成することが難しくなる．以下に手法の比較と本研究のアプローチについて述べる．

### 4.2.1 占有格子地図の作成手法の検討

#### 絶対的な位置の基準を用いない手法

占有格子地図の作成手法として，Montemerlo らが提案した FastSLAM [53–55] は，確率モデルに従って測域センサの連続するスキャンデータの重ね合わせを最適化し，閉ループ問題を解決することで走行軌跡の推定と地図の作成を同時に実行する “**SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)**” 技術の実装手法の一つである．一般的に屋内環境は周囲に壁があり，ロボットはスキャンデータを十分に取得できるため，閉ループ問題を解決して形状が正確な占有格子地図を作成することは比較的容易である．一方屋外では，場所によっては建物の外壁などのランドマークが少なく，ロボットはスキャンデータを十分に得ることができない．このような場所ではスキャンデータの重ね合わせが十分にできないため，走行軌跡の推定精度が低下して地図に誤差が生じ，閉ループ問題が解決できなくなる．この問題に対して原は過去のセンサデータを蓄積することで仮想的に計測距離と範囲が大きい測域センサのスキャンデータを作成した [56]．このデータと Rao-Blackwellized Particle Filter を用いることで閉ループ問題を解決し，形状が比較的正確な占有格子地図を作成可能なことを示した．しかし，この手法は基盤となるジャイロオドメトリの精度に依存する．スキャンデータを多く蓄積する区間が長くなるほど，ジャイロオドメトリの累積誤差によって地図の精度が低下し，地図形状に歪みが生じる問題がある．

#### 絶対的な位置の基準を用いる手法

これまでの研究で用いられている占有格子地図は基本的にオドメトリの走行軌跡が用いられ、測域センサのスキャンデータを走行軌跡に沿ってプロットすることで作成される。しかし、オドメトリによって算出した走行軌跡には累積誤差が生じるため、地図の範囲が大きくなるほど誤差が大きくなり、形状に歪みが生じる。このため、絶対的な位置の規準を用いる地図作成手法として、GPS または DGPS 測位を用いて走行軌跡の誤差を補正する手法が用いられる。伊達らは一般市街地の地図作成において、スキャンデータの重ね合わせによって推定した走行軌跡と、DGPS 測位点の軌跡の差が最少となるように走行軌跡の誤差を修正する手法を構築した [57]。この手法は、DGPS 測位精度が低下した区間ではスキャンデータのマッチングによる評価に依存するため、その間においてはオドメトリの精度が重要になる。本研究も同様に、DGPS 測位によってオドメトリを補正することで、閉ループ問題の解決の成功率を向上させるアプローチをとる。

#### 4.2.2 本研究のアプローチ

本研究では占有格子地図の作成において、ロボットが DGPS 測位精度の評価によって抽出した比較的精度の高い「**DGPS 高精度測位点**」と、スキャンデータのマッチングによる「**閉ループ問題の解決**」の2通りの手法でオドメトリを補正し、より正確な走行軌跡を推定する手法を構築する。すなわち、この手法ではロボットが初めて通過する未知領域では DGPS 高精度測位点を用いて走行軌跡を推定し、一度以上通過した既知領域では地図とのマッチングを用いて推定する。これによって DGPS 測位の方位と一致し、かつランドマークに不整合がない占有格子地図を比較的簡単に作成することができる。

### 4.3 DGPS 高精度測位点の抽出

本研究において DGPS 高精度測位点はロボットの走行軌跡の累積誤差を補正するための基準点である。そのため、本研究では占有格子地図作成時において、走行軌跡の累積誤差から経路のループ区間で生じる閉ループ問題に対して、FastSLAM で提案されているスキャンデータと地図とのマッチング処理によって解消する手法を用いる。その前段階の準備として、本研究では誤マッチングが生じないように DGPS 高精度測位点によって走行軌跡を補正し、誤差を最小化しておく。以下、DGPS 高精度測位点の抽出手法について述べる。

#### 4.3.1 アプローチ

著者は、ロボットが DGPS 測位精度を他のデバイスを用いることなく評価することで、シンプルかつ汎用性の高いシステムの実現を目指している。高い建物などの影響のない場所で

DGPS の測位精度は 50[cm] 程度であることから、この程度の測位精度が得られていると推定される測位点を高精度測位点として抽出する。しかしながら、一般的に DGPS 測位の精度評価は真値が得られないので単独では難しい。そのため本手法では、以下の二つの仮定に基づいて測位精度を評価する。

1. 直線走行した区間で DGPS の測位点も走行軌跡と同様の直線であれば誤差が小さい
2. 測位点の間隔は測位時間におけるロボットの移動距離と同程度となる

このような考え方の評価方法として、Morales らは拡張カルマンフィルタの枠組みによる自己位置・姿勢の推定を用いて GPS の測位位置を予測し、マルチパスなどによる外れ値を判別する NISTest を提案した [58]。この手法ではジャイロオドメトリと拡張カルマンフィルタの更新ステップを利用してマルチパスなどによる外れ値を判別するため、精度がジャイロオドメトリの誤差量に依存する。これに対して本手法では DGPS 測位のみを用いるため、ジャイロオドメトリの精度には依存しない。

#### 4.3.2 抽出手法

本研究における DGPS 高精度測位点の抽出手法について述べる。ロボットが直線走行しているとき、DGPS 測位点の軌跡も図 4.1 に示すように直線に近似できる。また、DGPS 測位点の間隔は測位周期 (1[Hz]) とロボットの速度から算出される距離とほぼ同じ値になる。このことから、DGPS 測位点の軌跡に対して主成分分析を行うことで、その直線近似精度から測位精度を評価する<sup>1)</sup>。すなわち、第一主成分の寄与率が高いほど DGPS 測位点の軌跡は直線に近い [59]。一方、コースの曲線区間では曲率が大きいほど第一主成分の寄与率が小さくなる。また、コースの分岐点などで進行方向が大きく変化する場合においても直線近似精度が低下するため、曲線路の場合と同様に第一主成分の寄与率が低下する。しかしながら、曲線のコースであっても短く区切れば、その各区間を直線とみなすことができる。本研究ではこの区間距離をつくばチャレンジの実験走行の経験から 5[m] に設定した。また、測位点の間隔は経験から設定したしきい値をロボットの速度の 2 倍とした。連続する測位点の間隔がしきい値以下の測位点を対象として、以下の条件と精度評価の区間距離から近似直線を求める DGPS 測位点数を 7 個とした。

1. ロボットの速度を一般的な歩行者よりも少し遅い 0.75[m/s] に設定
2. DGPS 測位の更新周期を 1[Hz] に設定

本研究では DGPS 高精度測位点の抽出のしきい値を経験的に近似直線の第一主成分の寄与率が 0.999 以上の場合、最新の測位点を DGPS 高精度測位点として抽出する。また、本

<sup>1)</sup>主成分分析から求められる任意の時刻  $t$  における近似直線の傾き角度  $p\theta_t$  を用いてジャイロの補正も行うことができ、地図を持たない道なり走行を行う場合に有用である [61]。



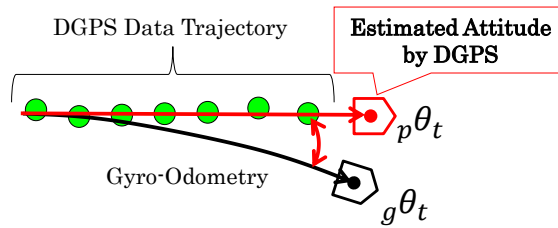


図 4.1 DGPS 測位の精度評価手法

研究で用いているパーティクルフィルタ，すなわち確率論に基づいたロボットの走行軌跡推定において，走行軌跡の仮説を表現するパーティクルの方位の偏りを抑制するため，DGPS 高精度測位点を一定距離以上の間隔で抽出する．本研究ではこの距離を 10[m] に設定した．

図 4.2 に示すつくばチャレンジ 2014 の課題コースにおいて，DGPS の測位精度の評価をした結果を図 4.3 に示す．図中の “Low Accuracy Data” が，測位点間隔の条件，および測位精度のしきい値 0.999 以下で棄却された測位点である．これより算出した高精度測位点の抽出結果，およびジャイロオドメトリによる走行軌跡を図 4.4 に示す．高精度測位点が測位精度が高い区間から抽出されていることがわかる．つくばセンターにおける曲線的な経路部分でも抽出されているが，これは上述したとおり，曲線であっても短く区切れば各区間は直線であるためと考えられる．一方，ジャイロオドメトリによる走行軌跡には，進行方向を大きく変更する区間で，DGPS 測位点列と比較して大きな誤差が生じている．本研究では，この誤差を DGPS 構成度測位点を用いて補正する．

#### 4.3.3 DGPS 高精度測位点に基づく占有格子地図

占有格子地図の作成手法の比較を図 4.5 に示す．本研究では，実験コースとして宇都宮大学工学部キャンパスに，図 4.5 (a) に示すとおり全周約 500[m] の周回コースを設定した．このときにロボットが取得した DGPS 測位点を図 4.5 (b) に示す．建物の近傍では，マルチパスと考えられる DGPS 測位の精度低下や，GPS 信号の消失によって考えられる測位点の欠落が発生している．図 4.5 (c) は，著者がジャイロオドメトリの走行軌跡上に測域センサのスキャンデータをプロットして作成した地図である．ジャイロオドメトリの累積誤差によって地図の形状が歪んでいることがわかる．これに対して DGPS 測位点列からジャイロの誤差を補正して作成した地図が図 4.5 (d) である (DGPS 測位点列からのジャイロの補正については付録 B に示す)．図 4.5 (c) と比較して走行軌跡の精度は向上しているが，DGPS の精度が低下した区間で増大した誤差が解消されず，地図に歪みを生じさせている．図 4.5 (f) は，これ以降に説明するパーティクルフィルタを用いた走行軌跡の推定によって作成した地図である．これは DGPS 高精度測位点を基準として，後述するパーティクルフィルタによって推定した走行軌跡に基づいて作成した地図である．この地図は形状がほぼ正確であるが，図 4.5 (g) に示すとおり，同一地点である Start と Goal が一致せず，1[m] 程度のズレが生じ



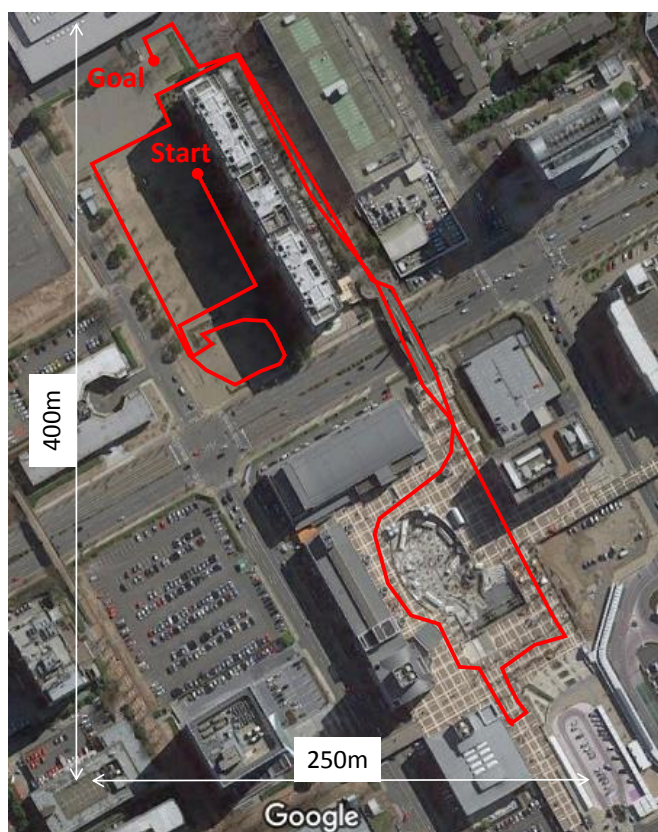


図 4.2 つくばチャレンジ 2014 の課題コース

ている。すなわち，閉ループ問題が解決されていない。しかし，他の環境でもこの程度の誤差に抑制できれば，スキャンデータと既存の占有格子のマッチングによってこの不整合を解消することが比較的容易に実現できる。以降，本節では DGPS 測位点を基準とした形状が正確な占有格子地図の作成手法について述べる。

### 4.3 DGPS 高精度測位点の抽出

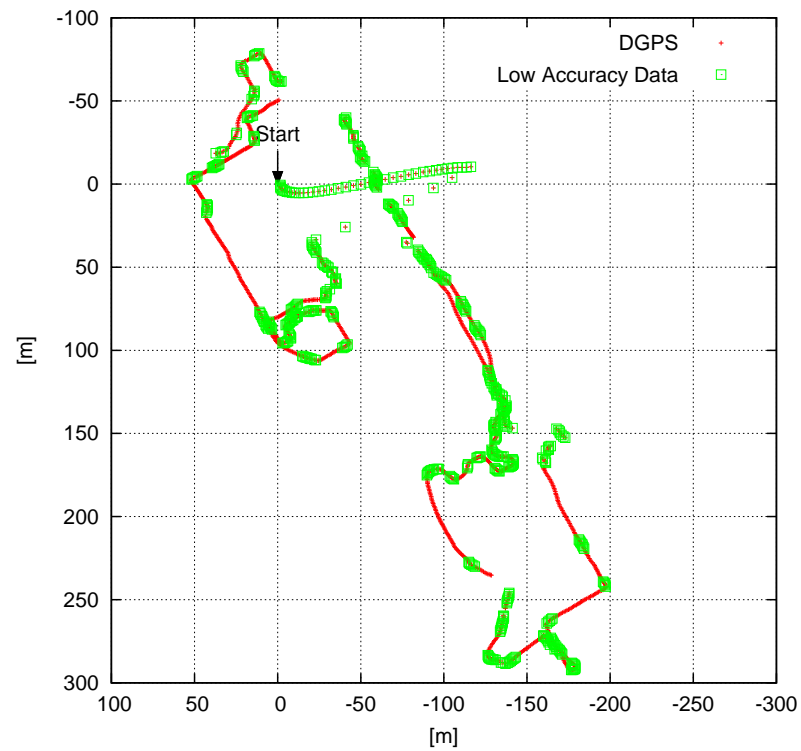


図 4.3 つくばチャレンジ 2014 の課題コースにおける DGPS 測位の精度評価の結果

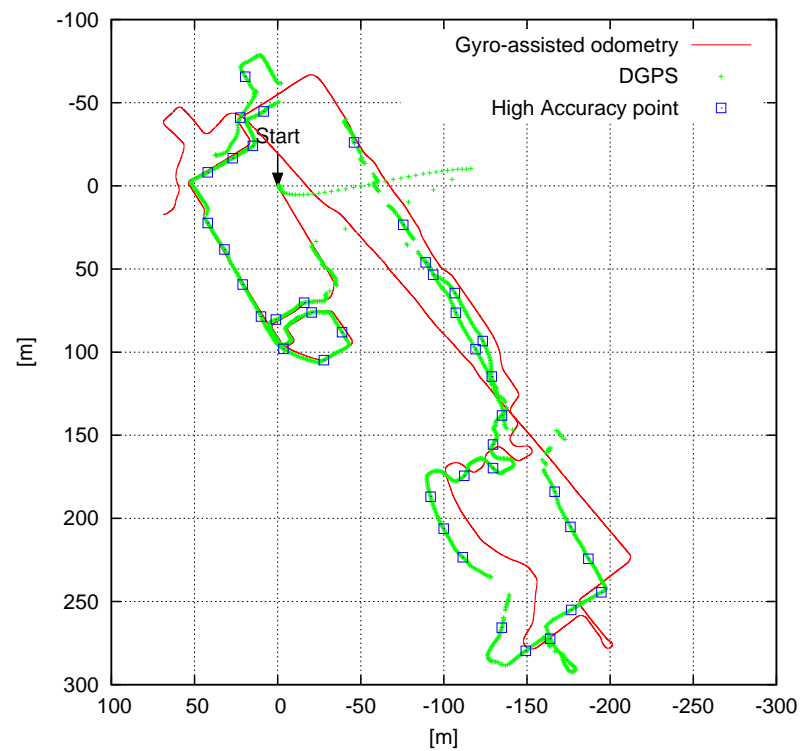


図 4.4 つくばチャレンジ 2014 の課題コースにおける DGPS 高精度測位点の抽出結果

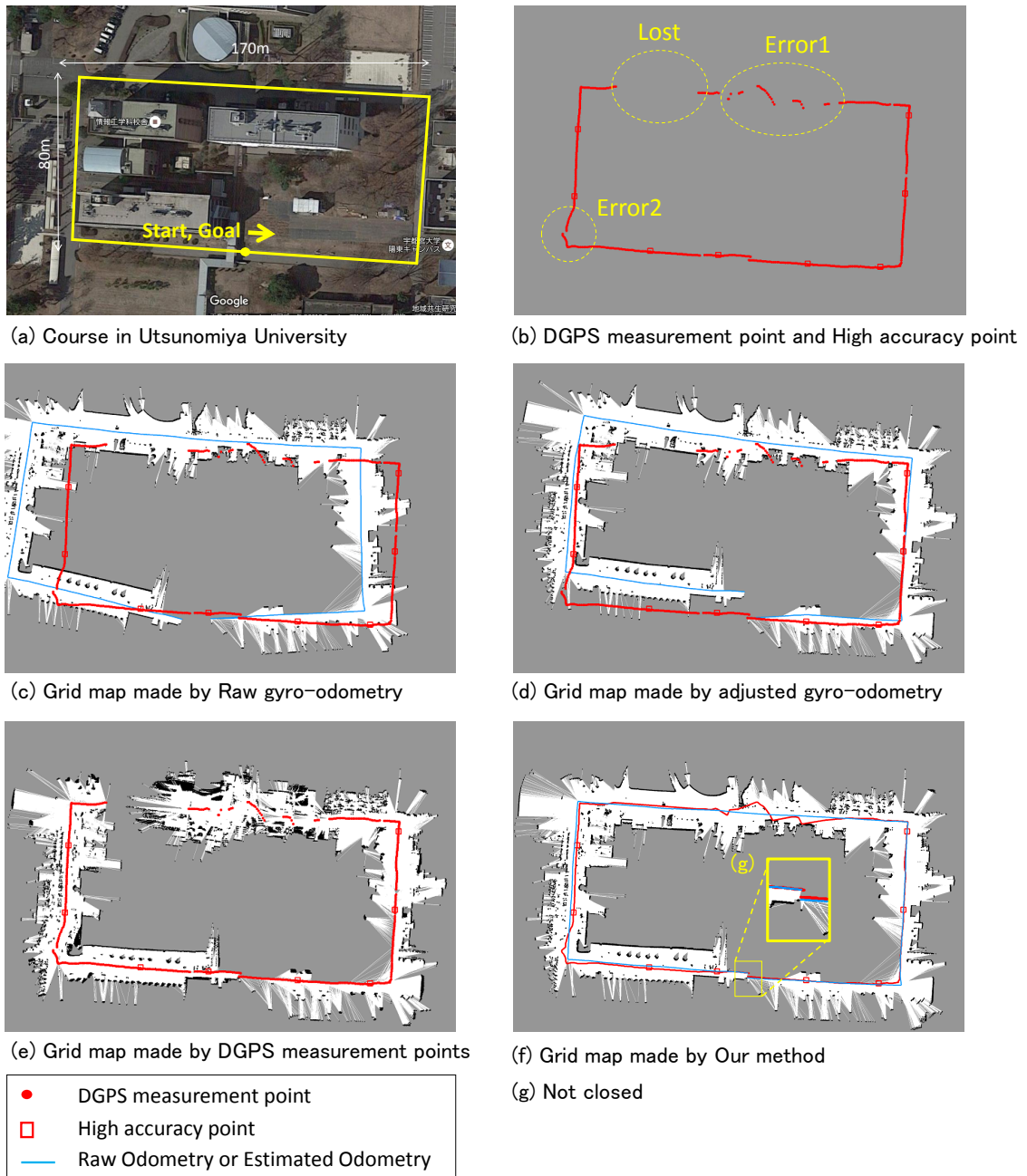


図 4.5 異なる手法によって作成した占有格子地図の比較

## 4.4 走行軌跡の推定

本研究では Montemerlo らによって提案された FastSLAM の枠組みで占有格子地図を作成する [53, 54]. すなわちロボットの位置・姿勢の仮説を 1 個のパーティクルで表し、ロボットの確率的な位置・姿勢を複数のパーティクルの分布で表現するパーティクルフィルタによってロボットの走行軌跡を推定する手法を用いる. 以下に, パーティクルフィルタによる走行軌跡の推定の流れを示す.

## 1. 予測

走行モデルによる各パーティクルの位置・姿勢の推定。

## 2. 評価

各パーティクルの尤度算出。本研究では DGPS 高精度測位点と既知の占有格子とのマッチングから求める。

## 3. リサンプリング

尤度の高いパーティクルをより多く残すため、尤度の低いパーティクルを消去し、尤度の高いパーティクルの複製を生成する。

FastSLAM では各パーティクルの軌跡によって地図が作成されることから、最も尤度の高いパーティクルの地図が最終的な占有格子地図とされる。パーティクルフィルタの処理を図 4.6 に示す。本研究において著者が構築した手法は、DGPS 高精度測位点、および既知の占有格子とのマッチングによる評価を、それぞれ独立に行う。

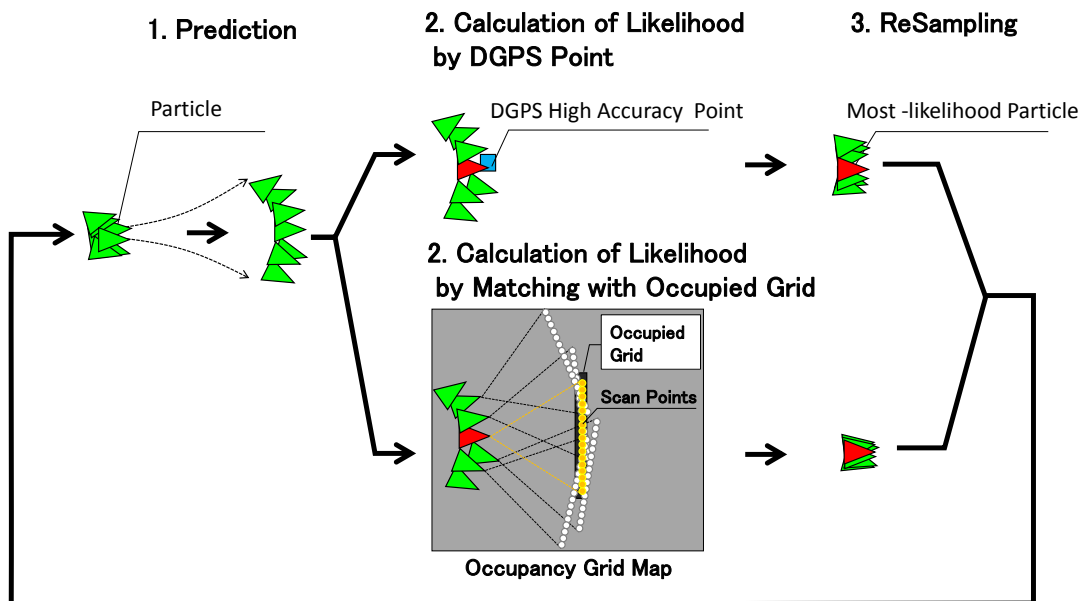


図 4.6 パーティクルフィルタ

## 4.4.1 パーティクルフィルタの走行モデル

$${}^i x_t = \int (v_t + \sigma_t) \cos^i \theta_t dt \quad (4.1)$$

$${}^i y_t = \int (v_t + \sigma_t) \sin^i \theta_t dt \quad (4.2)$$

$${}^i \theta_t = {}_g \theta_t + {}^i \phi \quad (4.3)$$

$$0 \leq i \leq M-1$$

FastSLAM ではロボットの確率的な位置・姿勢が複数個のパーティクルの分布によって表現される [55]. ジャイロオドメトリから求めた時刻  $t$  におけるロボットの速度を  $v_t$  とする. パーティクルの総数を  $M$  とし,  $i$  番目のパーティクル  $({}^i x_t, {}^i y_t, {}^i \theta_t)$  の走行モデルを式 (4.1),(4.2),(4.3) で表す. 式 (4.3) において  ${}_g \theta_t$  はジャイロの値を示し,  ${}^i \phi$  は  $i$  番目のパーティクルにおけるジャイロの推定誤差を表す [60].

## 4.4.2 DGPS 高精度測位点による評価

本研究では, DGPS 高精度測位点による位置・姿勢の推定をロボットが初めて通過する未知領域において行う. そのため, 各パーティクルと高精度測位点との距離を尤度とし,  $n$  個目の DGPS 高精度測位点  $({}_p x_n, {}_p y_n, {}_p \theta_n)$  と, 時刻  $t$  における  $i$  番目のパーティクルの距離を  ${}_n d_t$  とする. 本手法では高精度測位点に近いほど尤度が高いこと, および最大値を 1.0 以下に設定することから, 尤度  ${}_d w_t$  を式 (4.5) で表す [61].

$${}_n d_t = \sqrt{({}_p x_n - {}^i x_t)^2 + ({}_p y_n - {}^i y_t)^2} \quad (4.4)$$

$${}_d w_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi} {}_d \sigma} \exp\left(-\frac{{}_n d_t^2}{2 {}_d \sigma^2}\right) \quad (4.5)$$

${}_d \sigma$  は DGPS 測位の誤差を表す任意の定数である.

## 4.4.3 マッチングによる評価

本研究では, 地図とスキャンデータのマッチングの評価をロボットが一度以上通過した既知領域において行う. このためマッチングによるパーティクルの尤度を, 各パーティクルのスキャンデータが占有地図上の占有格子と一致した割合より求める. 時刻  $t$  における  $i$  番目のパーティクルに対して地図とマッチングしたスキャンデータ数  ${}_n i_t$  とする. これと測域センサのスキャンデータ総数  $N$  によりマッチング率  ${}_r i_t$  を式 (4.6) より求める. また, マッチングにおける各パーティクルの尤度  ${}_r w_t$  をマッチング率より式 (4.7) で表す.

$${}^i r_t = {}^i n_t / N \quad (4.6)$$

$${}^i_r w_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \exp\left(\frac{-\alpha(1-{}^i r_t)^2}{2\sigma_m^2}\right) \quad (4.7)$$

ここで  $\alpha$  および  $\sigma_m$  は任意の定数である。

#### 4.4.4 リサンプリング

FastSLAM におけるパーティクルフィルタのリサンプリングのルールは、尤度が高いパーティクルほど多く自身の複製を残すことである。これによってパーティクルの分布が収束してゆくことで自己位置・姿勢の推定精度が向上する。本研究では時刻  $t$  において  $i$  番目のパーティクルが作成する自身の複製の数を、全パーティクルの尤度の総和と自身の尤度から式 (4.8) により求める。 ${}^i m_t$  は時刻  $t$  における  $i$  番目のパーティクルが作成する自身の複製の数である。 ${}^i w_t$  は  ${}^i_r w_t$  または  ${}^i_d w_t$  のいずれかの尤度を表す。また、ジャイロの誤差  ${}^i \phi$  は式 (4.9) により更新される。 ${}^i \rho$  は正規分布に従う乱数である。

$${}^i m_t = M \frac{{}^i w_t}{\sum_{k=0}^{M-1} {}^k w_t} \quad (4.8)$$

$${}^i \phi \leftarrow {}^i \phi + {}^i \rho \quad (4.9)$$

## 4.5 占有格子地図の作成実験

### 4.5.1 実験コースの設定

本節では DGPS 測位を用いた占有格子地図作成の実験について述べる。本手法を評価する実験コースとして、著者は図 4.7 に示す宇都宮大学工学部の構内に全周約 860[m] のコースを設定した。コースの通過地点は図に示すとおり、順に “R1-R2-R3-R4-R1-R5-R6-R7-R1” である。このコースは “R1” のような複数回通過する区間において、位置・姿勢の推定誤差によって生じる閉ループ問題の解決が課題となる。建物に囲まれている区間では、マルチパスによる DGPS 測位精度の低下が発生する可能性がある。また、一般的にジャイロの誤差はカーブやコーナーなど進行方向が大きく変化する区間で、それまでの区間より大きく生じる。これによってジャイロオドメトリに誤差が生じるため、走行軌跡の補正が必要となる。このように本実験コースには、本研究の占有格子地図の作成手法を評価する条件が備わっている。



図 4.7 宇都宮大学工学部に設定した実験コース

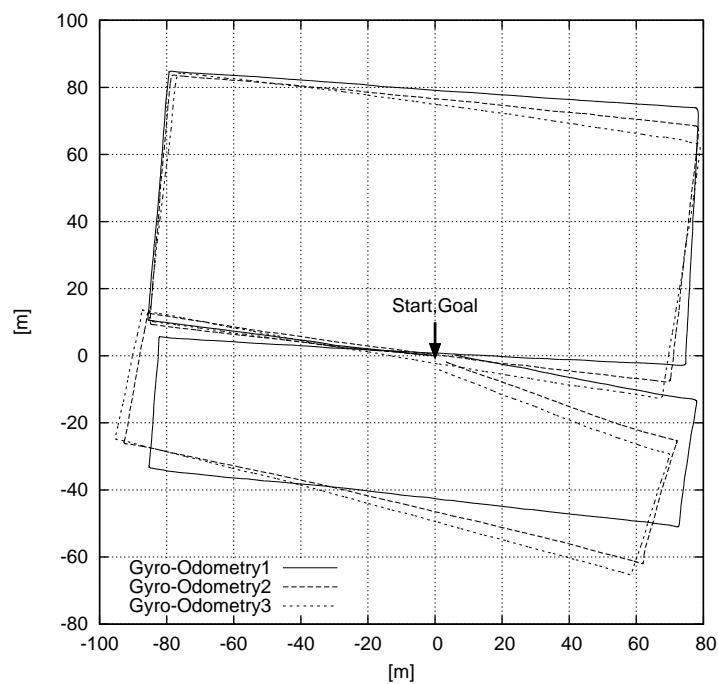


図 4.8 ジャイロオドメトリによる走行軌跡

#### ジャイロオドメトリによる走行軌跡

地図作成の再現性を評価するため、著者は実験コースを3回、ロボットを手動走行させてジャイロオドメトリのデータと2次元測域センサのスキャンデータを取得した。図4.8に3回の実験コース走行における走行軌跡を示す。ロボットが進路を大きく変更する度に誤差によって形状が大きく歪んでいることがわかる。特に進行方向がほぼ直角に折れ曲がるコー



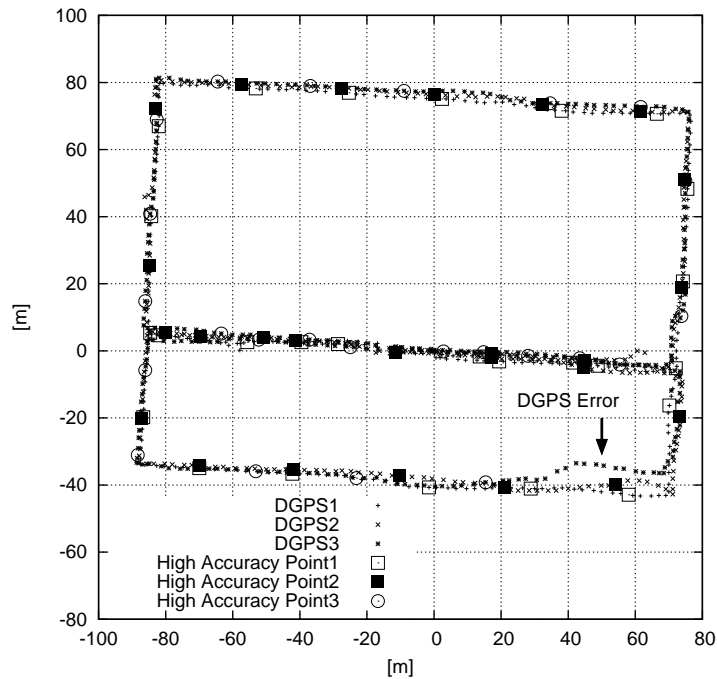


図 4.9 DGPS 測位点の軌跡と DGPS 高精度測位点

ナー部の前後で大きな誤差が生じている．これ以降，この走行軌跡を基準として占有格子地図を作成する手法について述べる．

#### DGPS 高精度測位点

図 4.9 に，実験コースを手押しでロボットを 3 回走行させて取得した DGPS 測位の軌跡と，それらより抽出した高精度測位点を示す．特に図に示す“DGPS3”では，“DGPS Error”で示す区間で高い建物によるマルチパスと考えられる測位精度の低下区間がある．これらを除いて，DGPS 高精度測位点が直線走行区間から抽出されている．

#### 4.5.2 DGPS 高精度測位点の評価で作成した地図

本手法を用いて，ジャイロオドメトリと DGPS 高精度測位点よりロボットの走行軌跡を推定した結果を図 4.10 に示す．コースの重複区間である“R1”において走行軌跡に最大 2[m] 程度のずれが生じている．また，DGPS 測位の誤差が最も大きい“PF3”を用いて作成した占有格子地図を図 4.11 に示す．“R1”において走行毎に観測した同一のランドマーク（建物の外壁）が一致しない不整合が生じている．これは閉ループ問題が解決されていないことを示している．

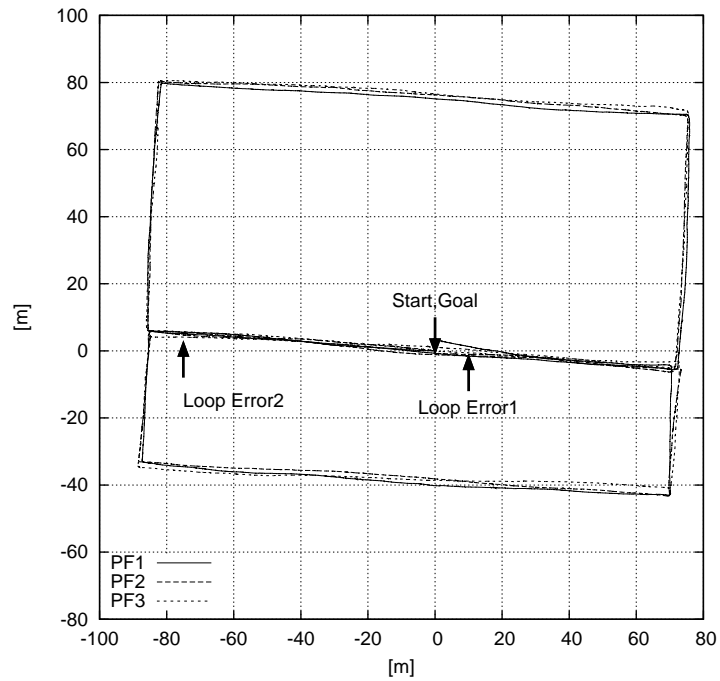


図 4.10 DGPS 高精度測位点から推定した走行軌跡

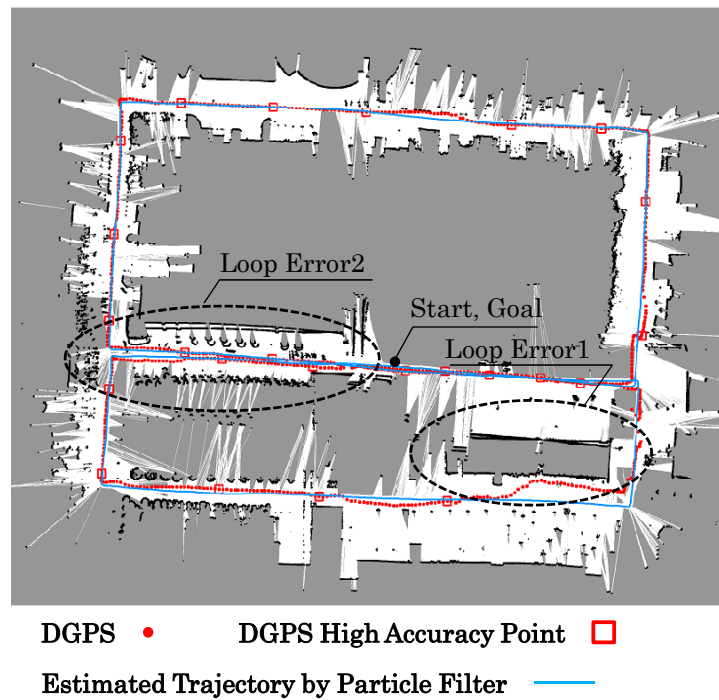


図 4.11 DGPS 高精度測位点から推定した走行軌跡による占有格子地図

#### 4.5.3 DGPS 高精度測位点とマッチングの評価により作成した地図

図 4.12 に、本手法を用いて DGPS 高精度測位点およびマッチングによる評価で推定した 3 回分の走行軌跡を示す。DGPS 高精度測位点のみで推定した走行軌跡（図 4.10）と比較し

て重複区間“R1”において3回の走行軌跡がほぼ一致した。図 4.13 に、“PF3”が表す走行軌跡を用いて作成した占有格子地図を示す。複数回観測したランドマークの地図上の不整合が解消されていることがわかる。すなわち、閉ループ問題が解決された。その一方で、直線区間では地図に若干の歪みが生じている。これについて筆者は、DGPS 高精度測位点の間隔が長い区間では、パーティクルフィルタに設定したロボットの姿勢の誤差によって走行軌跡に誤差が累積するためと考えている。

#### 4.5.4 コーナーでのリサンプリングにより作成した地図

図 4.12 において、コーナー付近(図 4.12 に示す“Corner”)で3回の走行軌跡がほぼ重なっていることから、これまでの本手法による走行軌跡推定の再現性が比較的高い。このことから、さらに高精度な占有格子地図を作成するため、コーナーをリサンプリング点に設定し、既知領域での閉ループ処理を併用して再度走行軌跡の推定を行う。本研究においてコーナーの定義は、ジャイロオドメトリによるロボットの姿勢変化が $60[\text{deg}]$ 以上の地点とした。

図 4.14 に推定した走行軌跡を示す。3回の走行軌跡が全区間を通じて $1[\text{m}]$ 以下ではほぼ一致している。図 4.12 に示す DGPS 測位点と閉ループ処理によって推定した走行軌跡と比較して直線走行区間の歪みが小さく、精度の再現性が高い走行軌跡が得られている。この図における“PF3”の走行軌跡を用いて作成した占有格子地図を図 4.15 に示す。方位と形状の精度が高い占有格子地図が作成できていることがわかる。

#### 4.5.5 つくばチャレンジ 2014 の課題コース

本研究で構築した占有格子地図の作成手法を用いて、著者は図 4.2 に示すつくばチャレンジ 2014 の課題コースの地図を作成した。図 4.4 に示すジャイロオドメトリによる走行軌跡を、DGPS 高精度測位点、および閉ループ処理を用いて補正して作成した占有格子地図を図 4.16 に示す。本研究では占有格子地図のデータサイズと、走行環境に対して必要な分解能から、占有格子地図の格子サイズを $10[\text{cm}]$ とした。この図において“White”の領域がロボットの走行軌跡で、“Black”の領域が建物などのランドマークをセンシングした測域センサのスキャンデータによる占有格子を表す。先述の閉ループ問題の解決によって、課題コースの往路と復路が重なる区間でランドマークが相互の位置関係に矛盾なく再現されていることがわかる。一般的には、占有格子地図の範囲が大きくなるほど閉ループ処理が難しくなる。これに対して本手法は地図の範囲によらず正確な地図を作成することが可能である。

本手法では占有格子地図をビットマップ形式の画像として作成する。地図作成において環境中の建物の外壁などのランドマークを確実に占有格子とするため、測域センサのスキャンデータをすべて描画する。そのため、地図上には歩行者の軌跡などのノイズも含まれる。このようなノイズを地図に描画しない手法として、同一場所で複数回観測された対象を地図に描画する手法が用いられている。しかし本研究において、著者は環境のランドマークを確実に

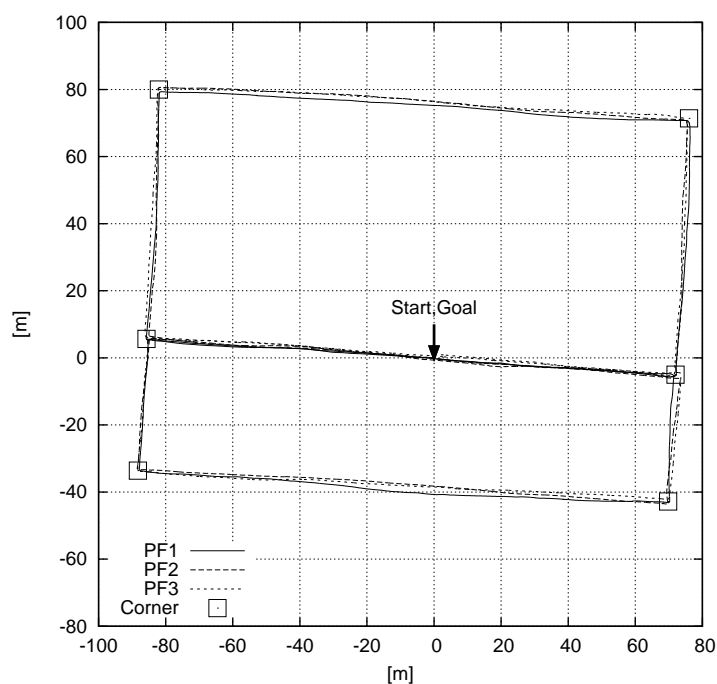


図 4.12 DGPS 高精度測位点と閉ループ処理により推定した走行軌跡

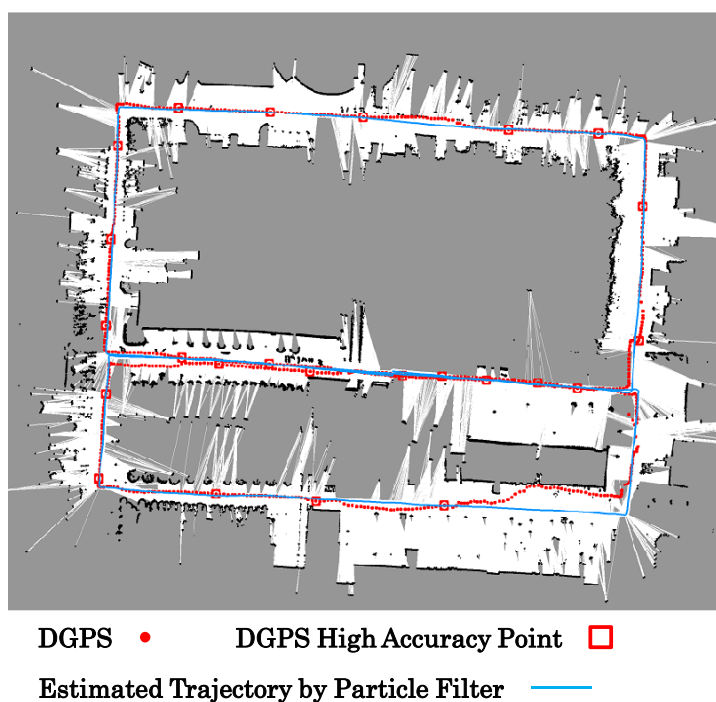


図 4.13 DGPS 高精度測位点と閉ループ処理より推定した走行軌跡による占有格子地図

に描画することを重視する。したがって占有格子地図において歩行者の軌跡などのノイズが顕著な場合、人手によって既存のペイントツールを用いて削除・修正することとした。

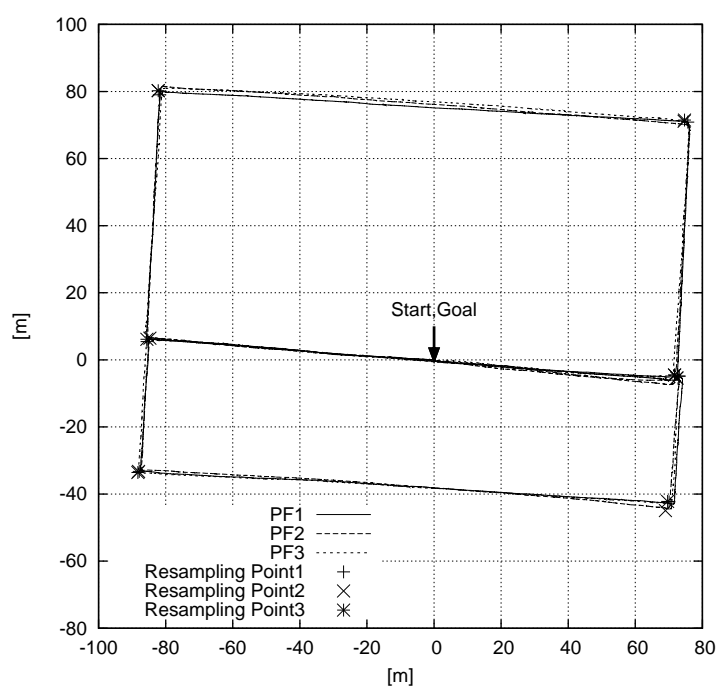


図 4.14 DGPS 高精度測位点と閉ループ処理, および  
コーナーでのリサンプリングより推定した走行軌跡

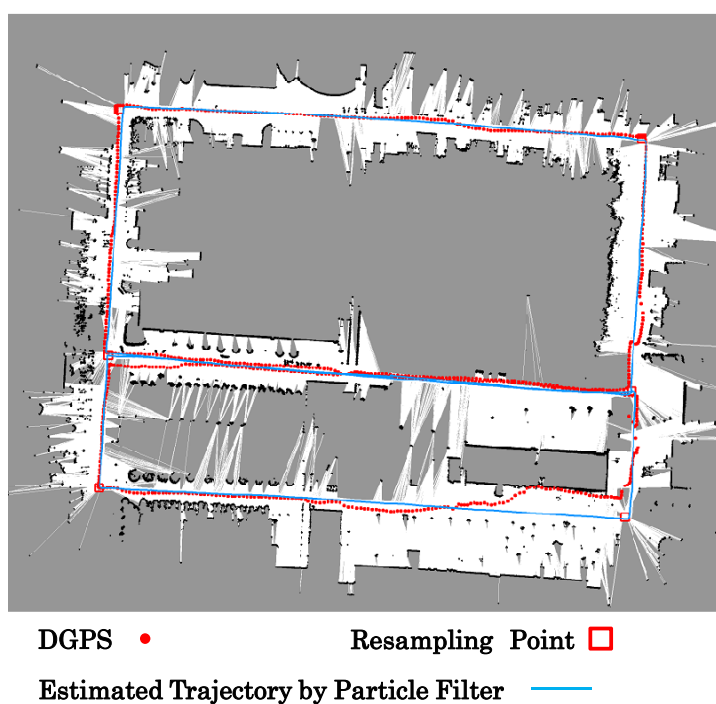


図 4.15 DGPS 高精度測位点と閉ループ処理, およびコーナーでの  
リサンプリングより推定した走行軌跡による占有格子地図

## 4.6 自己位置・姿勢の推定の評価実験

占有格子地図の目的は自律移動ロボットの環境における自己位置・姿勢の推定である。本研究では自己位置・姿勢の推定手法として、確率モデルに基づく“Monte Carlo Localization”



図 4.16 つくばチャレンジ 2014 の課題コースの占有格子地図

を用いる．これによって確率的に自己位置・姿勢の識別を行う．

一般的に自律走行における自己位置・姿勢の再現性の評価は難しい．自律走行では歩行者や他のロボットの回避行動を含むため、走行毎に環境条件と走行軌跡が異なる．そのため、走行軌跡の単純な比較ができない．ゆえに、著者は自己位置・姿勢の推定に対する評価は、複数回の走行から統計的に行うよりも、それぞれの実験走行における発生事象と、それが自己位置・姿勢の推定に及ぼした影響を考察した方が有用であると考え、したがって本研究では、実際に屋外環境をロボットに自律走行させて自己位置・姿勢の推定を行った結果から、その有効性を検証する．

#### 4.6.1 安定性の評価

##### 自己位置・姿勢の推定の破綻

一般的に2次元測域センサのスキャンデータと占有格子地図のマッチングが正確に行われている状態では、自己位置・姿勢の推定精度は格子サイズオーダーであるため、格子が小さいほど精度が高くなる。一方、ランドマークを観測したスキャンデータと、そのランドマークを表す地図上の占有格子との間に誤マッチングが生じた場合、それによって推定した自己位置・姿勢に誤差が生じる。その結果、さらなる誤マッチングが発生する。この繰り返しの結果、自己位置・姿勢の誤差が増大し、最終的にロボットは正確な自己位置・姿勢を推定することができなくなる。このような状態から正常にマッチングできていた状態に復帰することは非常に難しい。これが本研究で定義した自己位置・姿勢推定の「破綻」である。占有格子地図とのマッチングによる自己位置・姿勢の推定は、この「破綻」を抑制することが大きな課題である。したがって、本研究では測域センサと占有格子地図のマッチングによる自己位置・姿勢の推定を安定性によって評価する。

##### 自己位置・姿勢の推定の安定性に対する評価手法

自己位置・姿勢の推定の安定性は、環境中の物体を計測したスキャンデータが占有格子地図とマッチングした割合(マッチング率)が大きいほど高いことから、マッチング率によって評価できる。本研究では、図示したときの視覚的な認識の容易性からマッチング率と等価な「非マッチング率」で安定性を評価する。非マッチング率は、式(4.10)に示すとおり、環境のセンシングに成功したスキャンポイントのうち、占有格子地図とマッチングしなかった割合を表す。非マッチング率が高い状況は、ロボットの自己位置・姿勢の推定ができない状況である。このような状態が長く続くほど、自己位置・姿勢の破綻が発生する可能性が高くなる。すなわち、非マッチング率が高いほど自己位置・姿勢の推定の安定性が低いといえる。

$$\text{非マッチング率} = \frac{\text{占有格子地図とマッチングしなかったスキャンポイント数}}{\text{環境のセンシングに成功したスキャンポイント数}} \quad (4.10)$$

#### 4.6.2 実験走行

本手法における自己位置・姿勢の推定の安定性の検証をつくばチャレンジと同程度の距離と環境で行うため、宇都宮大学工学部キャンパスに全周1200[m]の実験コースを設定した。図4.17の左側にコース全体を示す。この図の右側に本手法によって作成した占有格子地図を示す。この実験コースで、2014年10月に著者が実験走行を行った結果を図4.17の占有格子地図上に示す。歩行者に対するロボットの回避行動が数回あったが、コースの全区間で安定して走行した。図4.17の各区間の自律走行の非マッチング率の大きさを円の半径で表



す。また、走行区間による非マッチング率を図 4.18 に示す。各区間における走行の考察を次に述べる。

- 区間 (1)

図 4.17 に示す区間 (1) は、実験コースにおけるロボットの進行方向の右側に建物、左側に植栽があり、マッチングに用いることのできるランドマークが比較的多い。ロボットはスタート直後に歩行者を回避したため、そのときの動きによって一時的にマッチングがずれて非マッチング率が増大した。しかし時間経過によって姿勢が安定し、再度非マッチング率が低くなった。このような一時的な姿勢の誤差は、ロボットの姿勢が大きく変化したときのジャイロの応答性によるものであり、姿勢の安定化に伴って収束する。

- 区間 (2)

図 4.17 に示す区間 (2) の前半は直線であり、後半が変化の多い曲線的な経路となっている。この区間では周囲にランドマークとなる建物が多いため、区間全体を通じて非マッチング率が比較的低く、ロボットは安定した自己位置・姿勢の推定ができています。

- 区間 (3)

図 4.17 に示す区間 (3) の後半で建物などのランドマークが少なくなっている。そのため、図 4.18 に示すように、場所によっては非マッチング率が 0.8 以上となり、ロボットの自己位置・姿勢の推定の安定性が低下した。

- 区間 (4)

図 4.17 に示す区間 (4) は実験コースにおいて最も長い直線区間である。一般的に直線区間ではロボットの走行は安定する。後半部分では非マッチング率が高くなっているが、これはロボットが空き地を通過する際に、雑草をセンシングしたことによると考えられる。

- 区間 (5)

図 4.17 に示す区間 (5) は、コースの曲がり角で非マッチング率が高くなっている。先に述べたように、これについても姿勢の変化に対してジャイロオドメトリの応答が遅れることが原因と考えられる。

- 区間 (6)

図 4.17 に示す区間 (6) の前半部分はランドマークとなる建物があるため、自己位置・姿勢の推定は安定する。後半は建物がなくなり、雑草をセンシングするため、若干非マッチング率が向上している。

- 区間 (7)

図 4.17 に示す区間 (7) のコースの曲がり角で非マッチング率が高くなっている。右手

に駐輪場があり、自己位置・姿勢の推定精度が低下した瞬間に自転車を回避して姿勢がぶれると、その後間違ったランドマークに誤マッチングする可能性がある。

- 区間 (8)

図 4.17 に示す区間 (8) は比較的短い区間であるが、非マッチング率が高い。これは、両側が草むらであり地図と形状が異なるためである。

- 区間 (9)

図 4.17 に示す区間 (9) は、2 次元測域センサの測定範囲にランドマークとなる建物が少なく、非マッチング率が高い状態が続いている。本研究では、ジャイロオドメトリの精度が比較的高いため、地図とのマッチングが十分にできない状況でも即座に自己位置・姿勢が破綻することはないが、このような状態が長く続くほど安定性が低下する。

宇都宮大学工学部構内に設定した 1200[m] の実験コースでは、ロボットは安定した自律走行を実現できた。しかし、ランドマークの少ない区間では自己位置・姿勢の破綻が発生する可能性が高くなった。その対策としてランドマークの少ない区間では歩道の境界などの特徴を地図に登録し、自己位置・姿勢の推定に用いる手法が考えられる。

## 4.7 まとめ

本章では、一般市街地環境における高精度な自己位置・姿勢の推定手法について述べた。最初に、自律走行の基準となる自己位置・姿勢の推定には、精度と再現性において測域センサのスキャンデータと占有格子地図とのマッチングによる手法が有効であることを述べ、これに用いる占有格子地図の作成手法について説明した。占有格子地図の作成手法は FastSLAM の枠組みを用いた。ロボットのジャイロオドメトリにより取得した走行軌跡に沿って 2 次元測域センサのスキャンデータをプロットすることで占有格子地図を作成する。本研究ではジャイロオドメトリの累積誤差を DGPS 測位点によって補正することとした。そのため、マルチパスなどの影響が少なく比較的精度の高い測位点 (DGPS 高精度測位点) を、以下の手法によって抽出した。

1. DGPS 測位のサンプリング時間におけるロボットの移動距離と測位点の間隔の比較
2. ロボットが直線走行したときの測位点列に対する主成分分析を用いた直線性の評価

本研究では DGPS 高精度測位点による評価をパーティクルフィルタによる FastSLAM の枠組みに取り入れ、形状が正確で経路とランドマークに矛盾のない占有格子地図の作成手法を構築した。

占有格子地図とのマッチングによる自己位置・姿勢の推定においては、パーティクルフィルタによる Monte Carlo Localization を用いることとした。その有効性を検証するため、宇



図 4.17 宇都宮大学工学部 1200[m] コース

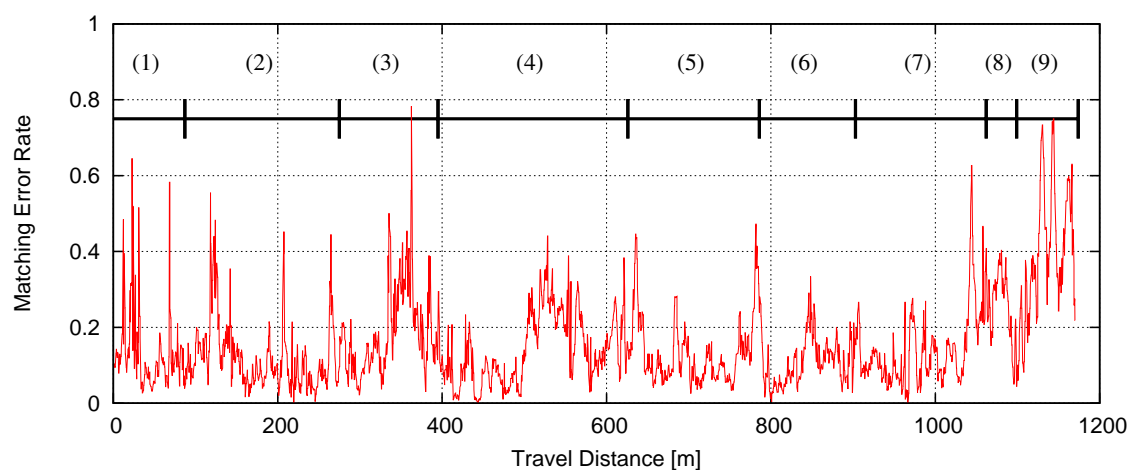


図 4.18 宇都宮大学工学部 1200[m] コースにおける非マッチング率

都宮大学工学部キャンパスに設定した走行距離 1200[m] のコースで実験走行を行った。自己位置・姿勢推定の安定性の評価として、2次元測域センサのスキャンポイントにおいて占有格子地図にマッチングしない割合を表す「非マッチング率」によって評価した。その結果、実験走行ではランドマークが少なくマッチングが十分にできない場所においてもロボットは自律走行することができたが、マッチング率が低下した区間で2次元測域センサに外乱が入

力された場合，自己位置・姿勢の推定が破綻する可能性があることがわかった．これについては，次章で述べる走行可能領域の識別と組み合わせることで，より安定した自己位置・姿勢の推定の実現を目指す．

## 第5章

# 走行可能領域の識別

### 5.1 はじめに

一般市街地におけるロボットの自律走行において、事前に設定されたコースは最も確実な走行可能領域である。したがってロボットの基本動作は、安定した自己位置・姿勢の推定によってコースを逸脱しないように走行することである。一方で、進路上の物体に対する回避、および探索などのタスクによってはロボットはコースを自ら逸脱する必要がある。したがって、ロボットがより確実に自律走行を行うためには、ロボット自身が走行可能領域を識別する必要がある。

一般環境において車輪型移動ロボットの場合、ロボットが走行できる領域は、ロボットが置かれた位置と連続した平面である。一方、段差や縁石などの平面以外の領域は、ロボットが、その機構および車輪径によって乗り越えられる場合があるが、それは社会との親和性の観点から望ましくないため、本研究ではロボットが走行できない領域と考える。したがって本研究では走行可能領域を、ロボットから連続した平面領域と定義する。ゆえに本研究において走行可能領域の識別は平面以外の領域の抽出と等価である。これまでの研究では、縁石や段差のような立体物は非接触センシングによって識別する手法が多くとられている [62]。非接触センサにはいくつかの種類があるが、本研究では3次元測域センサによって段差を識別する。一方で地面との高低差が小さい段差は、路面の凹凸やうねりによってロボットの姿勢が前方に傾いたときに、ロボットがセンシングする地面と区別することがが難しい。また、落ち葉と路面上の物体の区別も問題となる。落ち葉ならば、ロボットはそのまま走行できるが、石などは回避する必要がある。しかしながら3次元測域センサのような形状のみのセンシングでは、多様な物体の種別を識別することは難しい。したがって著者は、ロボットが乗り越えられる程度の段差をしきい値とし、それより小さい段差は非接触センシング以外の手段として接触センサでロボットが識別する手法を構築する。著者はつくばチャレンジの課題コースの観察した結果、非接触センサによる段差識別の下限値を5[cm]とし、これより低い段差は接触センサで識別することとした。本研究における走行可能領域の識別のアプローチを以下に示す。

#### 1. 非接触センサによる識別

3次元測域センサによって段差を抽出することで走行可能領域を識別する。

#### 2. 接触センサによる識別

動輪が段差に接触したときの電流値の変化によって識別する。

## 5.2 関連研究

走行可能領域としての平面の抽出手法には、2台のカメラからなるステレオビジョンを用いた手法が提案されている [63–65]。これらの手法には、路面の画像データを1回の撮像で取得可能であることから少ない撮像回数で広範囲をセンシングできる利点がある。その一方でいくつかの問題点がある。入江はステレオビジョンによる自己位置・姿勢の推定に基づいて、ロボットの市街地における自律走行実験を行った。そこで見出した問題として、日照による影や路面のテクスチャによってはノイズが生じ、正確な環境の特徴抽出が出来ない場合があることを指摘している [63]。奥富らはステレオ画像からの射影変換行列の抽出によって平面領域を抽出する手法を提案している [66]。この手法では、タイルなど路面のテクスチャが複雑な領域では、それらがノイズとなり、小さな物体との判別が難しい。物体の形状を高精度でセンシングできる測域センサを用いた平面抽出では、一般的にノイズによる誤抽出が少ない。このことから屋外の段差を抽出する手段として、大川は1本のレーザビームを水平に走査する2次元測域センサを斜め下向きに設置し、地面の凹凸をスキャンする方法を用いている [67]。この手法ではセンサが固定されるため、ロボットの前方領域をセンシングするにはロボット自身が動く必要がある。それゆえにロボットが前方物体を識別する前にそれと接触するリスクがある。また、吉田は2次元測域センサをアクチュエータで揺動して3次元センシングを行う手法が提案している [38]。この方式は比較的簡単な構成で多くの3次元スキャンデータを取得できる。しかし、段差の抽出には垂直方向に密なセンシングが必要となるが、1回のスキャンデータ列が斜めになるため、垂直方向の密度が低くなる問題がある。一般的な3次元測域センサは、複数のレーザビームを、それぞれ角度を変えて走査する複数のレーザビーム方式で構成されている。例として Velodyne 社製の3次元測域センサ “HDL-32e” は、水平方向  $360[\text{deg}]$  の範囲を、32本のレーザビームを垂直方向  $41.3[\text{deg}]$  の範囲で照射することで環境を走査している [68, 69]。この方式は垂直方向の分解能がレーザビームの数に依存する。すなわち、高低差の小さい段差を抽出することが難しい。

## 5.3 本研究の手法

本研究では走行可能領域の識別において、垂直方向に密度の高い3次元スキャンデータを取得するため、3次元測域センサ (北陽電機, YVT-X001) を用いる [47, 70]。このセンサは、1本のレーザビームを図 5.1 に示すように垂直方向に正弦波状に走査し、環境をセンシングする。この図における各点はレーザビームによる測距点 “Spot” を表す。図 5.1 は3次元測域センサから仮想的に半径  $5[\text{m}]$  の円を内側からセンシングしたときの Spot を表している。3次元測域センサは垂直方向に走査するため、先に述べた2次元測域センサを揺動する方式、および複数レーザビーム方式と比較して垂直方向に分解能が高い。この特徴は段差の抽出において有利である。また、比較的小型であることから、小型の移動ロボットに適している。

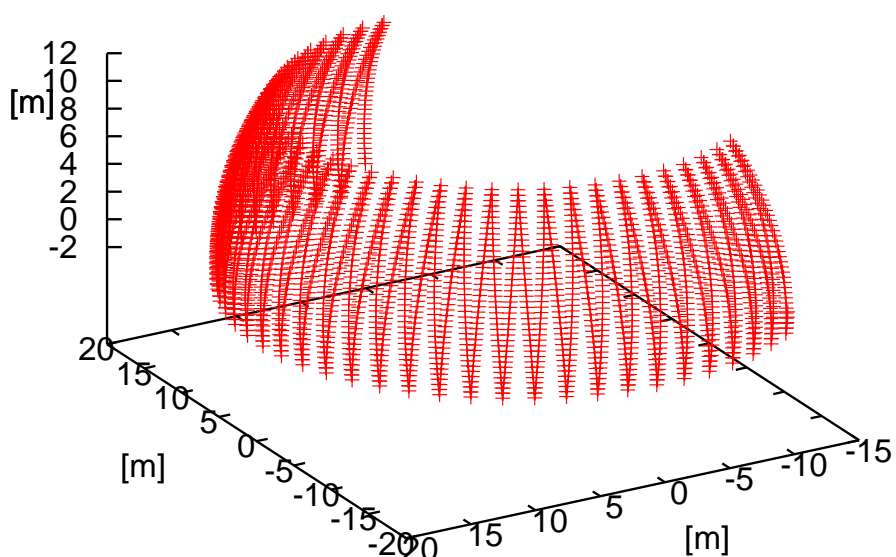


図 5.1 3次元測域センサのスキャン形状



図 5.2 低所特徴の例

### 5.3.1 低所特徴

本研究では上り方向の段差を上段差，下り方向の段差を下段差と定義する．さらに，本研究では地面との区別が難しい高さ 10[cm] 以下の上下段差，縁石，芝生と道路の境界を低所特徴と定義する．低所特徴の例を図 5.2 に示す．



### 5.3.2 課題

一般市街地の路面には舗装のうねりや凹凸があるため、ロボットが自身に搭載された測域センサ(ここでは2次元と3次元の両方を含む)を常に水平に維持することは難しい。ロボットの姿勢によっては測域センサが下を向いて地面をセンシングするため、地面を低所特徴として誤抽出する問題がある。このため本研究では、事前にロボットによる地面のセンシング結果をテーブル化し、ロボットが自律走行時に取得したスキャンデータと比較することで段差などの低所特徴を抽出する手法を構築する。

## 5.4 非接触センサによる低所特徴の抽出

本研究において低所特徴の抽出には二つの目的がある。一つはロボットによる回避と、もう一つは低所特徴を用いた自己位置・姿勢の推定である。すなわち、ロボットと低所特徴の相対的な自己位置・姿勢を求めることで、低所特徴との距離をより安定して維持することをねらいとしている。ロボットの自己位置・姿勢を再現性高く推定する手法として、占有格子地図と2次元測域センサのスキャンデータのマッチング量に基づく確率的な手法である“Monte Carlo Localization”が多く用いられている [55]。本研究においてもこの手法を用いている。また、第4章で述べたとおり、つくばチャレンジにおいて完走したロボットの多くがこの手法を採用した [31, 37, 39, 67]。しかしながら、交差点などロボットの進路が大きく変化する領域では、2次元測域センサでセンシングできる建物などのランドマークが少ないため、ロボットの自己位置・姿勢の推定精度と安定性が低下し、ロボットがコースを若干逸脱する場合がある。そのとき、ロボットが識別できていない縁石などに接触してリタイアとなる可能性が高くなる [73]。このため、本研究では低所特徴をランドマークとしてロボットの自己位置・姿勢を推定することでロボットが経路から逸脱することを抑制する手法を構築する。低所特徴を用いた自己位置・姿勢の推定手法は後述の第7章で述べることで、本章では低所特徴の抽出手法について述べる。

### 5.4.1 低所特徴の抽出の要件

研究のねらいとした走行可能領域の識別に対して、本研究で用いるロボットが乗り越えられる段差が5[cm]以下であること、および先述のとおり落ち葉との区別から、抽出する段差の高低差を5[cm]以上とした。また、低所特徴の誤抽出(以下、ノイズ)はロボットの走行に影響を与え、急停止および回避行動を選択させる可能性がある。その結果、走行経路を逸脱してリタイアに至る可能性があるため、低所特徴の抽出手法にはノイズが少ないことが求められる。以上より、低所特徴の抽出の要件を下記の二つとする。

1. 高低差 5[cm] 以上の低所特徴を抽出すること

## 2. ロボットの走行に影響を与えるノイズがないこと

## 5.4.2 3次元測域センサ

本研究で用いる3次元測域センサ YVT-X001 において、図 5.3 に示すレーザビームの測定距離  $r$  と水平角度  $\phi$  および垂直角度  $\theta$  から、スキャンポイントの3次元座標  $x, y, z$  を式 (5.1)-(5.3) により求める [70]。図 5.5 は以下の説明のため、図 5.1 に示す3次元測域センサのレーザビームの走査を2次元平面上に表した図である。3次元測域センサは図 5.5 に示すように1本のレーザビームを水平 210[deg]、垂直方向に +35[deg] から -5[deg] の範囲で走査し、そのサンプリング周期は 50[msec] である。レーザビームの垂直方向の1往復は 74 個の Spot(レーザビームによる測距点) から構成され、それを 1Line とする。1回の走査は全体で 36Line であり、3次元測域センサは第4エコーまでを取得する。本研究では路面の段差をより高精度にセンシングするため、センサを倒立させて取り付けた。

## 5.4.3 アプローチ

環境中の物体の抽出において、一般論として Spot の地面からの高さを算出することが考えられる。しかし、先述のとおり3次元測域センサによるセンシングは路面の凹凸や傾斜に影響され、地面との高低差が小さい物体ほどその影響は大きい。この理由を著者は次のように考えている。環境中のセンシング対象となる物体は遠方にあるほど、それをセンシングする3次元測域センサのレーザビームの角度が水平に近くなる。ゆえに3次元測域センサのわずかな姿勢の変化でレーザビームの物体に当たる位置が大きく変化する。このため、センサから遠くにあつて地面との高低差が小さい物体ほど抽出精度が低下する。屋外環境では路面のうねりなどによってセンサの姿勢が一定に維持できない状況があることから、地面の高低差が小さい低所特徴を高さの計測によって抽出するアプローチでは誤抽出が多くなる。

低所特徴は高さの算出以外に、水平距離からでも抽出できる。この説明において低所特徴を上段差とする。同じ Spot におけるレーザビームの到達距離(地面:  $l_g$ , 段差:  $l$ ) を比較して、図 5.4 (a) に示す上段差の方が、同図 (b) に示す地面よりも小さく、 $l_g > l$  となる。同様にそれぞれの Spot の水平距離(地面:  $r_g$ , 段差:  $r$ ) を見ると、 $r_g > r$  となる。著者らは段差の抽出に水平距離  $r$  を用いる利点を次のように考えている。センサの  $x$  軸に微小誤差  $\xi$  の傾斜があるとき、 $x, y, z$  の計測結果は、それぞれ式 (5.4)-(5.6) で表すことができる。高さ  $z$  では水平角度  $\theta$  が小さいとき、 $\sin$  成分の寄与が大きいため、式 (5.6) に示すとおり微小誤差  $\xi$  の影響がある。これに対して式 (5.7) に示す水平距離  $r$  は、式 (5.4) と式 (5.5) より  $\cos$  成分の寄与が大きいため、 $\theta$  が小さいときには微小誤差  $\xi$  の影響はほぼない。したがって水平距離  $r$  を用いて段差を抽出する方が誤抽出が少なく抽出精度が高い。

Spot の集合(以下、Spot 群)から平面を抽出する手法として、RANSAC のような手法がある。これは Spot 群からランダムにサンプルを抽出することで、その統計的な傾向から平

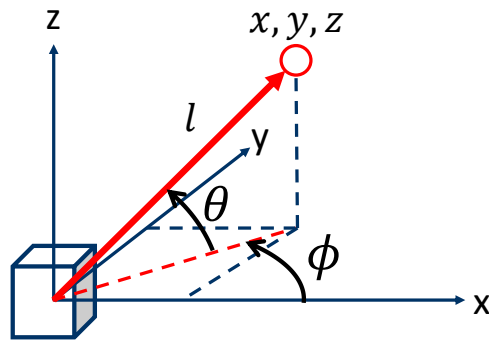


図 5.3 3次元測域センサの座標系

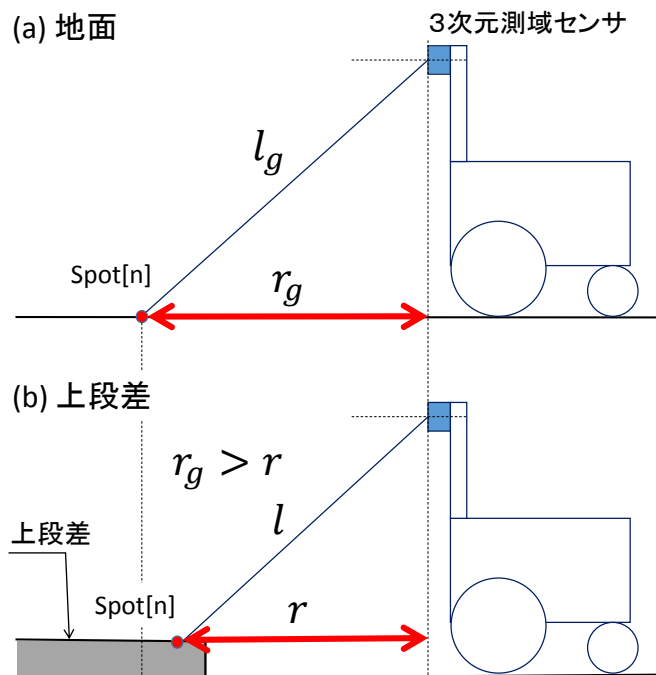


図 5.4 段差抽出の原理

面を推定する手法である．段差はその平面以外の外れ値として抽出される．この手法では Spot 群全体を評価しなければならないため冗長であり，計算コストが高い．また，段差が傾向からの外れ値であるため，平面領域の Spot が十分に得られない場合は段差の抽出精度が低下する．これに対して平面テーブルを用いる本手法では Spot を個別に評価できるため効率が良く，段差の抽出精度が高い．以上より本研究では各 Spot の水平距離から段差を抽出する．

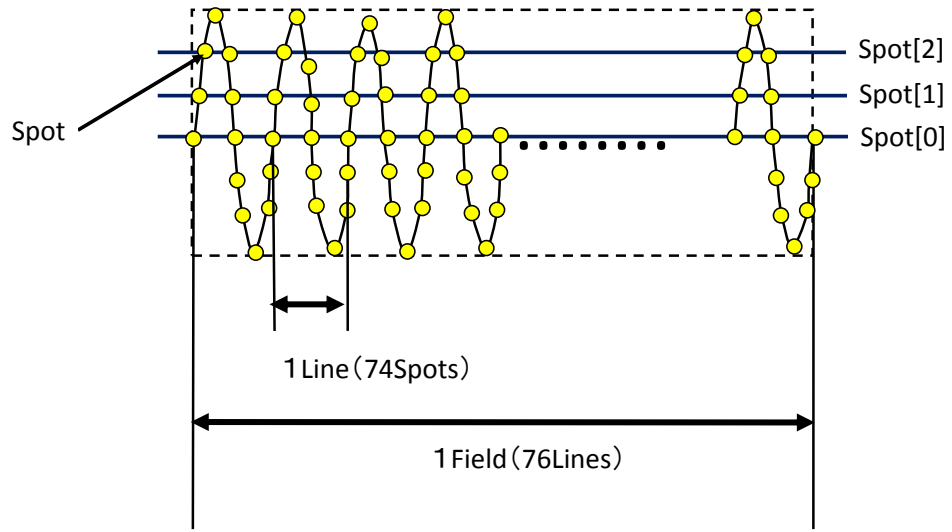


図 5.5 3次元測域センサのレーザビームの走査形状

$$x = l \cos \theta \cos \phi \quad (5.1)$$

$$y = l \cos \theta \sin \phi \quad (5.2)$$

$$z = l \sin \theta \quad (5.3)$$

$$\theta \approx 0, \xi \approx 0$$

$$x = l \cos(\theta + \xi) \cos \phi \approx l \cos \phi \quad (5.4)$$

$$y = l \cos(\theta + \xi) \sin \phi \approx l \sin \phi \quad (5.5)$$

$$z = l \sin(\theta + \xi) \approx l(\theta + \xi) \quad (5.6)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5.7)$$

$$R_n = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2} \quad (5.8)$$

$X_n, Y_n$ は地面をセンシングした値

#### 5.4.4 センシング手法

3次元測域センサの垂直方向の走査において各Spotに番号を割り当てたとき、図5.5に示すように同一番号のSpotは、同一水平直線上に並ぶ。n番目のSpotの水平距離 $r_n$ を式(5.7)で求める。Spotが地面にあるとき、Spot番号毎に同心円ができる。例として、図5.7に平面と両側に縁石のある道路に対して、それぞれSpot番号 $n=40$ のスキャン結果を比較する。平面(a)ではSpotは円に近い形状となっている。一方、縁石周辺(b)では形状が歪み、水平距離が小さくなっていることがわかる。

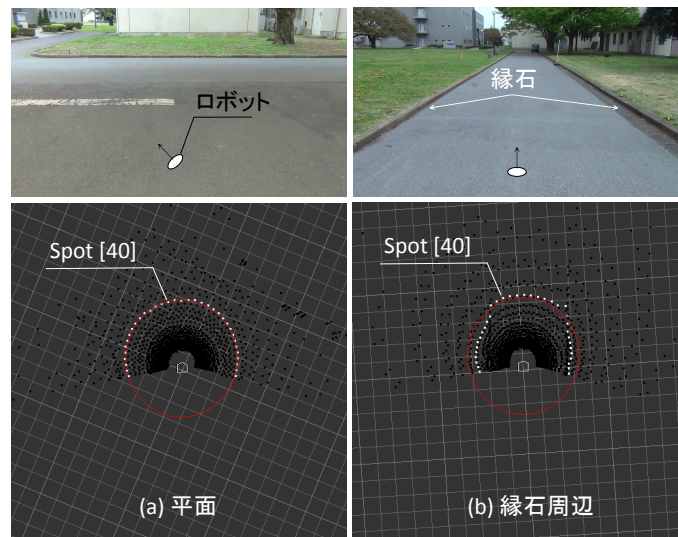


図 5.6 Scan Range

図 5.7 道路のスキャン形状の比較

平坦な地面にロボットを置いて、式 (5.8) に示すように地面をセンシングしたときの Spot 番号  $n$  の円の半径を  $R_n$  とする。スポット番号  $n$  と  $R_n$  の対応付けした結果が平面テーブルと定義する。段差の抽出は、 $R_n$  と  $r_n$  を比較することで行う。図 5.9 に平面テーブルの例を示す。Spot 番号  $n$  の 44 から 67 までの間はセンサのレーザービームが水平から上向きになることから地面をセンシングできないため、テーブルの値を 0 に設定した。また、Spot の地面に対する距離をテーブル化しても同様の結果が得られるが、2次元で表現できる水平距離の方が画面に表示したとき、開発者が視覚的に確認しやすい。このため本研究では平面テーブルに水平距離を用いた。また、本手法の実施はテーブル化の他に、レーザの照射角度から幾何学的に水平距離を算出することも可能である。しかしながら実際にはセンサの取り付け位置・姿勢の誤差やロボットの姿勢の影響がある。よって著者は、実測値をテーブル化した方が、それらの誤差推定の必要がないため、扱いが容易であると考えた。以下、平面テーブルによる段差の抽出手法について述べる。

#### 上段差の抽出

上段差では、図 5.8 (a) に示すように高低差が大きいほど、平面上の距離  $r_n$  が小さく、 $r_n < R_n$  となる。したがって、 $r_n < \alpha R_n$  ( $0 < \alpha \leq 1$ ) のとき、その Spot を上段差とみなし、走行不可能領域とする。ここで  $\alpha$  は抽出対象とする段差の高低差によって設定する係数である。値が大きいほど小さい段差が抽出可能となるがノイズが増えるため、対象とする環境によって設定する必要がある。本研究では高さ 10[cm] 程度の上段差の実測から、これよりも若干低い段差を抽出できるように  $\alpha = 0.8$  に設定した。この値はセンサの取り付け位置と抽出対象とする段差の高さによって設定する。

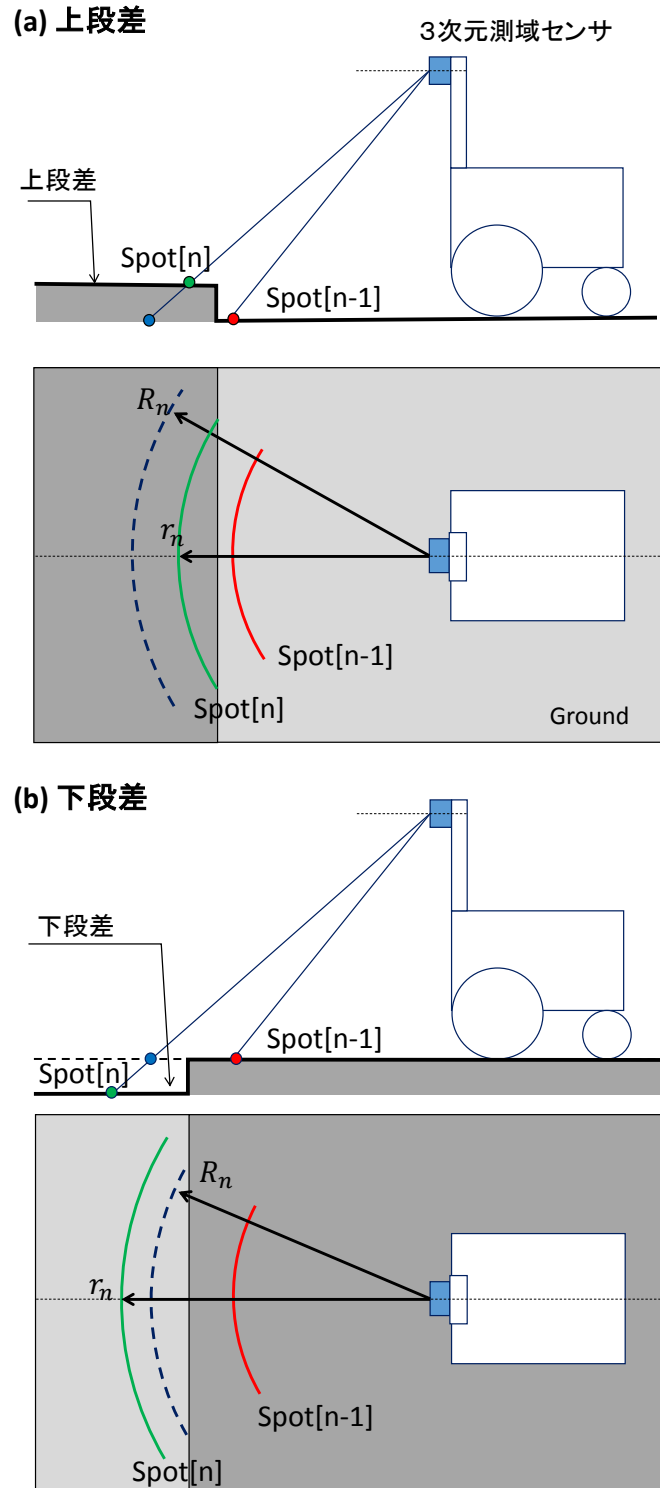


図 5.8 段差の抽出手法

## 下段差の抽出

下段差では，図 5.8 (b) に示すように Spot の水平距離  $r_n > \beta R_n$ , ( $\beta \geq 1$ ) のとき，下段差として走行不可能領域とする． $\beta$  は  $\alpha$  と同様の係数である．本研究では，実際の歩道を計測

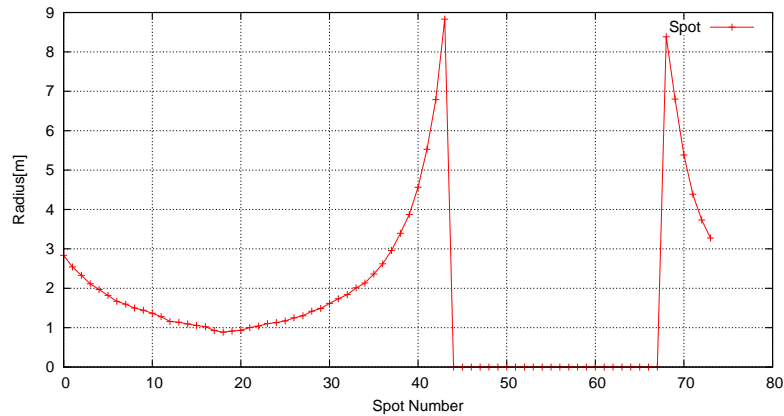


図 5.9 平面テーブル

し，高低差 15[cm] 程度の下段差を抽出することとし， $\beta = 1.18$  に設定した．

#### 平面テーブルの効果

本研究では段差の高さ  $z$  を式 (5.3) に示すようにレーザビームの到達距離  $l$  と垂直方向の角度  $\theta$  から算出する．したがって， $l$  が大きい遠方ほど  $\theta$  の誤差によって  $z$  が大きく変化する．これに対して平面テーブルは平面とそれ以外を判別するためのしきい値テーブルである．図 5.9 に示すように隣接する Spot 間で平面上の水平距離:Radius の変化の幅は一樣ではなく，Radius が大きい Spot 間ほど大きい．高さ  $z$  の測定で段差を抽出する場合には，先述のとおりロボットの微小な姿勢の変化でも遠方ほどレーザビームが照射される位置が大きく移動し，段差が抽出できない問題がある．これに対して平面テーブルではレーザビームの角度によってしきい値が変化し，遠方ほど姿勢の変化による誤差を許容することができる．したがって遠方において高さ  $z$  の算出よりも精度よく段差を抽出できる．その反面，正確な高さの値は得られないため，事前に抽出対象とする高さの段差をセンシングして  $\alpha$  と  $\beta$  を最適化しておく必要がある．また，平面テーブルでは路面の凹凸などで走行中のロボットの姿勢が大きく変化したときには段差の抽出は正確にできない．これについてはロボットの姿勢の計測による補正が必要がある．

#### 5.4.5 段差の抽出手法の比較

図 5.10 に示す宇都宮大学工学部キャンパスにおいて，歩道両側にある高さ 10[cm] 程度の縁石の抽出を行った．測定場所の測域センサの x 軸の傾斜角度は約 2[deg] である．図 5.11 にこの縁石に対して，本手法を含む 4 通りの抽出手法の比較を示す．





図 5.10 歩道の両端の縁石

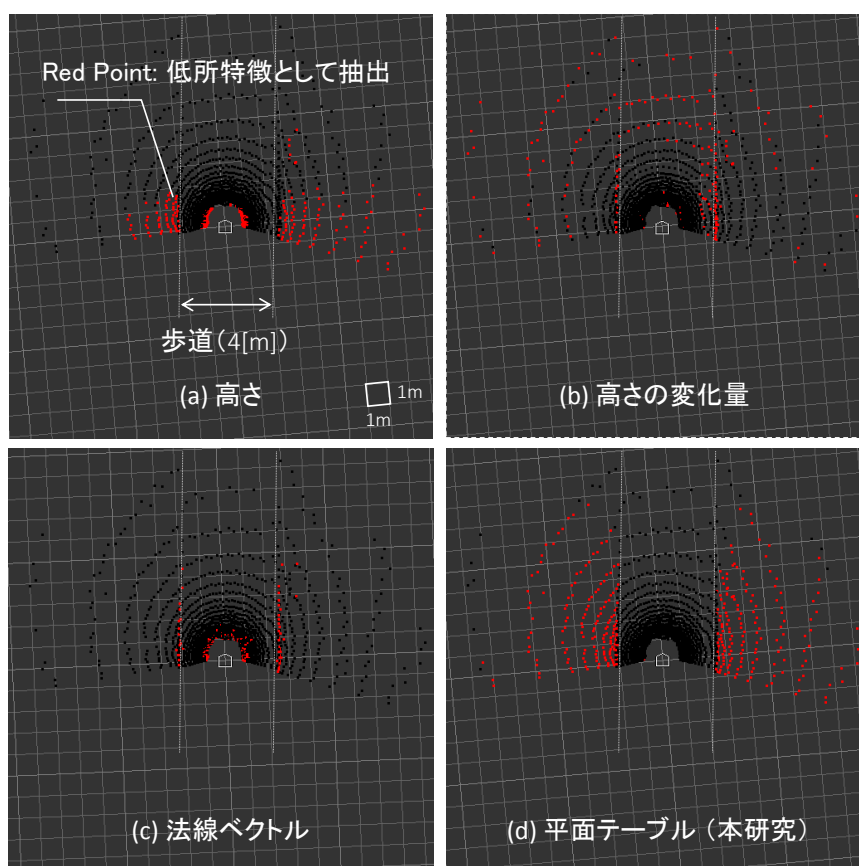


図 5.11 異なる手法による縁石の抽出結果の比較

## (a) 高さによる抽出

図 5.11 (a) は高さをしきい値 (10[cm]) として、高さの計測によって抽出を行った結果を示す。半径約 2[m] の範囲で縁石の抽出ができていない。しかし、それより遠方は抽出できていない。先述のとおり、センサの傾きによって遠方では低い段差の抽出精度が低下する。走行中にセンサの傾きを計測することが考えられるが、ロボット自身の加速度と区別が難しい。また、ロボットから 1[m] 程度の領域ではセンサノイズによる誤抽出が多く、ほぼそれらに占有されている。そのため、この範囲のデータは使用することができない。

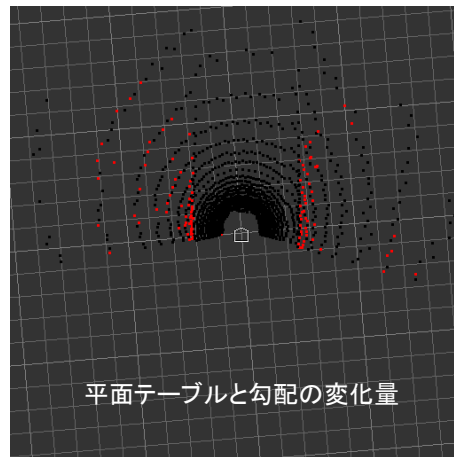


図 5.12 平面テーブルと勾配の変化量による縁石の抽出結果

## (b) 高さの微分による抽出

図 5.11 (b) は高さの計測結果の微分，すなわち連続する Spot 番号において高さの変化の絶対値が 5[cm] 以上の Spot を抽出した．左右の縁石のエッジ部分が抽出できている．一方，全体的にノイズが多く，特に図中で “Road Plane” として示す平面領域でもランダムに Spot が誤抽出されている．これらはロボットの自律走行において回避の対象となるため，ロボットの走行が不安定になる．

## (c) 法線ベクトルによる抽出

図 5.11 (c) は，隣接する 3 個の Spot からなる面の法線ベクトルによって縁石を抽出した．すなわち，面の正規化した法線ベクトルのうち，ロボットの方に向かっている x 軸成分と y 軸成分の大きさが 0.5 以上の点を抽出した．縁石の抽出には成功しており，5[m] 程度の範囲で十分に縁石の形状が判別できている．一方で，ロボットの周囲 1[m] 程度の範囲にノイズが多く発生している．ロボットがこれらのノイズと物体との判別することは困難であり，安定して走行しない可能性がある．

## (d) 平面テーブルによる抽出

図 5.11 (d) は，図 5.9 の平面テーブルによる縁石の抽出結果を示す．縁石の形状が正確に抽出できている．本研究では，データ量の削減の観点から，平面テーブルによる段差の抽出結果に対して，段差のエッジ部分である比較的急に勾配が変化する領域を抽出する．図 5.12 に，この平面テーブルによる段差の抽出結果に対して，連続する Spot 間の勾配が 2[deg] 以上の Spot を抽出した結果を示す．縁石のエッジ部分が抽出できている．また，遠方の Spot 数が図 5.11(d) と比較して減少しているが，接近に伴って Spot の密度が大きくなるため，安全に回避動作を行うことができる．以降，本稿ではこの手法によって段差をふくむ低所特徴の抽出を行う．

## 5.4.6 低所特徴の抽出例

図 5.13 に多様な段差の抽出結果を示す。以下、図 5.13 に示す番号順に説明する。

## (1) 交差点

図 5.13 (1) に示す交差点はロボットの両側が遠方まで見渡せるようになり、取得できる環境情報が大きく変化する場所である。それゆえに地図とのマッチング精度が低下し、ロボットがコースから逸脱する可能性があることから、走行可能領域を正確に抽出する必要がある。図 5.13(1) に示す場所は交差点直前で、道路の左右に高さ 10[cm] 程度の縁石がある。本手法によって、その円弧形状が抽出できている。

## (2) 狭い道

図 5.13 (2) に示す道は幅 2[m] 程度で、両側に 8[cm] 程度の縁石がある。また、路面の舗装の継ぎ目などでセンサの姿勢は変化する。このような状況下においても、抽出した走行可能領域の幅が 2[m] 程度であることから、縁石がほぼ正確に抽出できている。

## (3) 両側の縁石

図 5.13 (3) に示す道路は図 5.10 と同様に左右に縁石がある。左側の段差が約 5[cm] 程度で、右側が約 17[cm] である。また、道路の幅は約 4[m] である。左側の縁石については、センサから 2[m] 程度の範囲では十分に抽出できているが、遠方ほど精度が低下している。また、右側のセンシング結果では、建物の出入り口の小道が縁石と区別できている。

## (4) 下りのスロープ

図 5.13 (4) に示す小さな下りのスロープでは、ロボットの姿勢が前に傾くため、ロボットが地面をセンシングする。その結果、ロボットの前方がほぼ段差と判別された Spot で占有される。この状況におけるロボットの動作は第 6 章で述べる。

## (5) 緩やかな境界

図 5.13 (5) に示す歩道の両端の縁石は高さが 3[cm] であり、ロボットが乗り越えて走行できる。すなわち、走行可能領域が道の範囲を超えている。そのため、本手法では、この縁石を抽出することが困難である。段差の抽出以外のアプローチが必要であり、例として路面の舗装と芝をレーザビームの受光強度で識別する手法がある [74]。

## (6) 歩道端 (下段差)

図 5.13 (6) に示す歩道端は下段差であり、一般環境では図に示すように歩道が車道よりも一段高く作られていることが多い。このような下段差に対しても本手法で抽出できている。本研究では、このような下段差に対して走行可能領域の識別の観点から特に区別しない。そのためロボットは、これらに対して上段差と同様の回避を行う。

## 5.4 非接触センサによる低所特徴の抽出

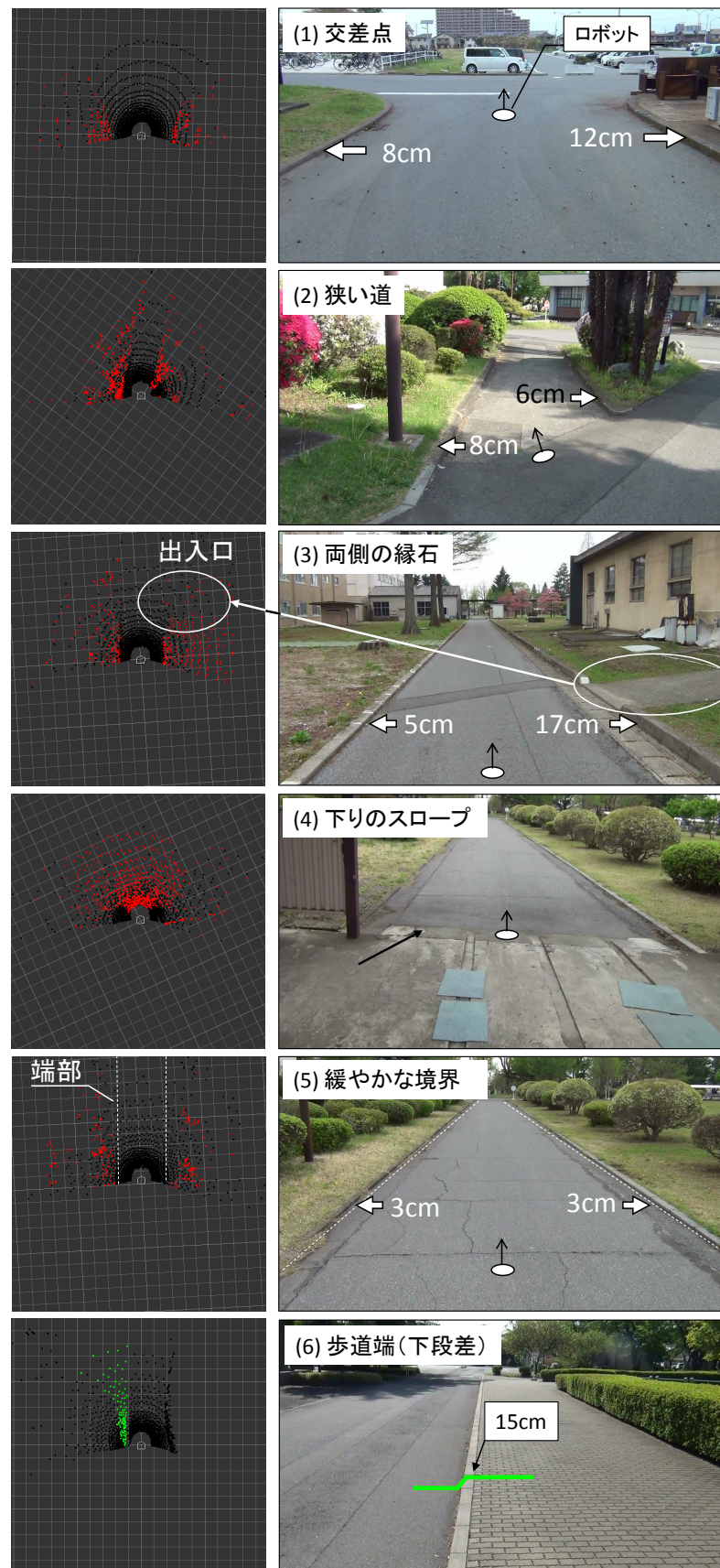


図 5.13 多様な低所特徴の抽出結果



## 5.4.7 自律走行実験

宇都宮大学の工学部キャンパスにおいて、図 5.14 に示す全長 600[m] の実験コースを設定した。スタート地点から 100[m] 程度の区間には低い縁石が道路の両側にある。本研究では第 4 章で述べたとおり、占有格子地図とパーティクルフィルタを用いた Monte Carlo Localization によってロボットの自己位置・姿勢を推定する。しかしながら、この手法は占有格子地図とのマッチングに用いる建物などのランドマークが少ない区間では自己位置・姿勢の推定精度が低下する。特に、スタート地点から 50[m] 程度は、図 5.10 に示すとおりランドマークが少ない開放区間であるため、ロボットが自己位置・姿勢の推定精度の低下によってコースを逸脱する可能性がある。したがって、この区間は本手法を用いて道路端の縁石を抽出し、接触の回避する動作の検証に適している。物体の回避動作として、実装の容易性から大島の手法を用いており、詳細は第 6 章で述べる [43]。



図 5.14 宇都宮大学工学部 600[m] 実験コース

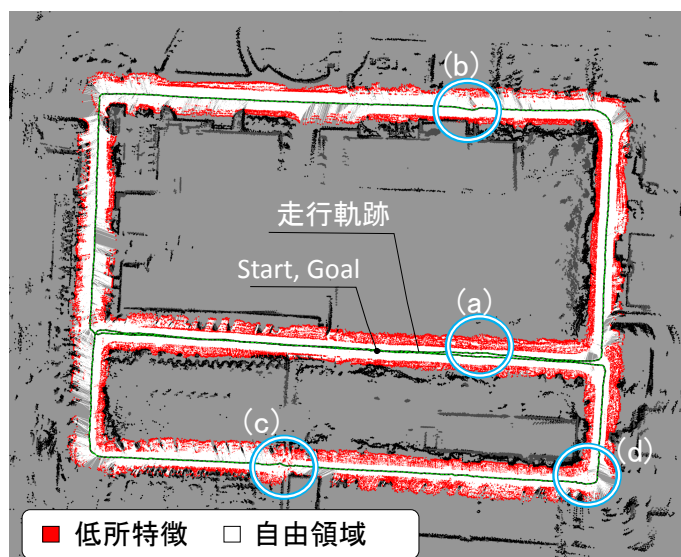


図 5.15 宇都宮大学工学部 600[m] 実験コースにおける低所特徴の抽出結果

## (a) 開放区間

スタート地点から 100[m] 程度の区間は地図とのマッチングに用いることのできるランドマークが少ないことから、ロボットの自己位置・姿勢の推定に誤差が生じる可能性が高い。この走行においても自己位置・姿勢の推定精度が低下した状況であった。そのため、図 5.15 (a) に示す地点ではロボットが低い縁石に接近したが、本手法によって段差を抽出できていたことから、障害物回避の機能によって段差との接触を回避した。ロボットがこの段差を抽出できていない場合、接触した可能性が高い。これ以降はランドマークが多い領域に到達したため、自己位置推定の精度が向上し、コースに復帰した。

## (b) 下りのスロープ

図 5.15 (b) に示す地点は、廊下と歩道が交差する場所である。この場所の画像は図 5.13 (4) であり、小さな下りのスロープがある。ここをロボットが通過する際、その姿勢が一時的に前のめりになったため、ロボットは 3 次元測域センサのスキャンデータに対して平面テーブルの正常な適用ができなくなった。その結果、路面を段差として誤抽出した。ロボットはそれらに対して回避を行ったため、コースを若干逸脱した。スロープを過ぎた時点でロボットの姿勢は元に戻り、コースに復帰した。

## (c) 交差点におけるふらつき

図 5.15 (c) に示す地点は右側に駐輪場があり、自己位置・姿勢の推定精度が低下した。この状況でロボットが交差点を曲がるときに道路の緩やかな勾配変化で路面をセンシングし、回避行動をとった。そのため、ロボットの走行にふらつきが生じた。他の交差点においても地面を低所特徴として誤抽出した状況が発生している。交差点では環境の変化が大きいため、地図とのマッチングに誤差が生じる可能性があり、自己位置・姿勢の推定精度が低下する可能性が、他の場所と比較して高くなる。

## 5.5 接触センサによる低所特徴の抽出

3 次元測域センサによって抽出できない低所特徴は、ロボットの動輪が接触することで抽出する。この手法では、低所特徴は上段差に限定される。ゆえに、抽出対象を上段差として、接触センサによる上段差 (以下、段差) の抽出手法について述べる。

ロボットの駆動輪が環境中の段差に接触した場合、駆動輪の DC モータに大きな負荷がかかり、それまでの走行時よりも大きな電流が流れる。ロボットは DC モータの電流量を常時モニタリングし、駆動輪が接触したときの急激な電流値の変化を検知することで段差を抽出する。電流値のモニタリングは第 3 章で述べたとおりモータドライバ (Hibot 社製, 1Axis DC Power Module) の負荷電流フィードバック機能を用いる。本研究では、つくばチャレン

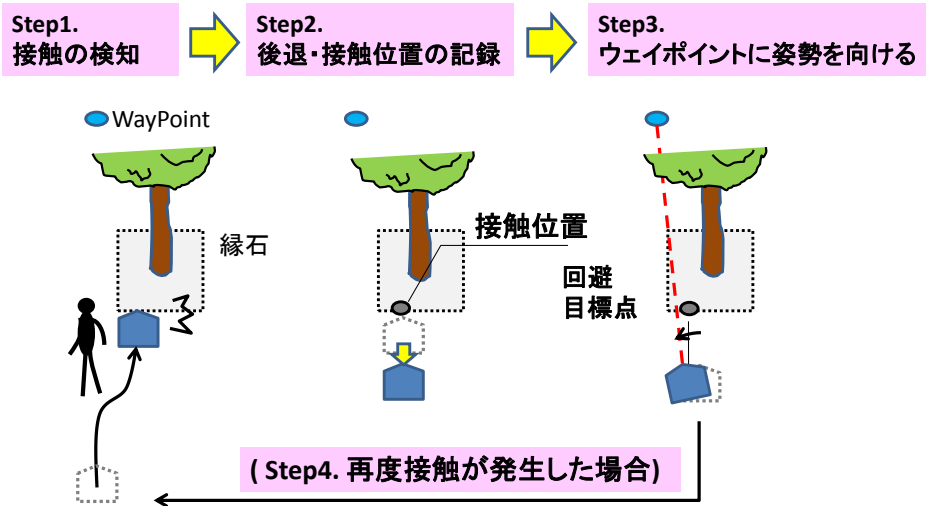


図 5.16 接触からの復帰動作

ジの実験走行から経験的に、ロボットの自律走行時において駆動輪の電流変化量が5[A]以上のとき、ロボットの駆動輪が低所特徴に接触していると判別することとした。

### 5.5.1 段差の回避動作

接触センサによる段差の回避は、接触の前後で自己位置・姿勢の精度が維持されることが必要である。一般的には、ロボットの動輪が段差に接触したときには駆動輪がスリップして空転するため、動輪のエンコーダで計測しているロボットの移動距離および姿勢と実際の値の差（以下、誤差）が増大する。これに対して本研究における自己位置・姿勢の推定手法では、移動距離の誤差が占有格子地図とのマッチングによって補正されるため、実際の位置からの誤差は比較的小さい。また、姿勢はジャイロの出力値から推定するため、車輪の空転には影響されない。

ロボットの動輪が接触した時の復帰動作を図 5.16 に示す。ロボットの回避行動の前提として、回避後はロボットは経路に復帰することとする。以下に、ロボットの回避の流れを示す。

**Step1** 接触を検知して後退する

**Step2** ウェイポイントの方向にその場で回転

**Step3** 段差を仮想的な回避対象として、ウェイポイントへの追従走行を再開



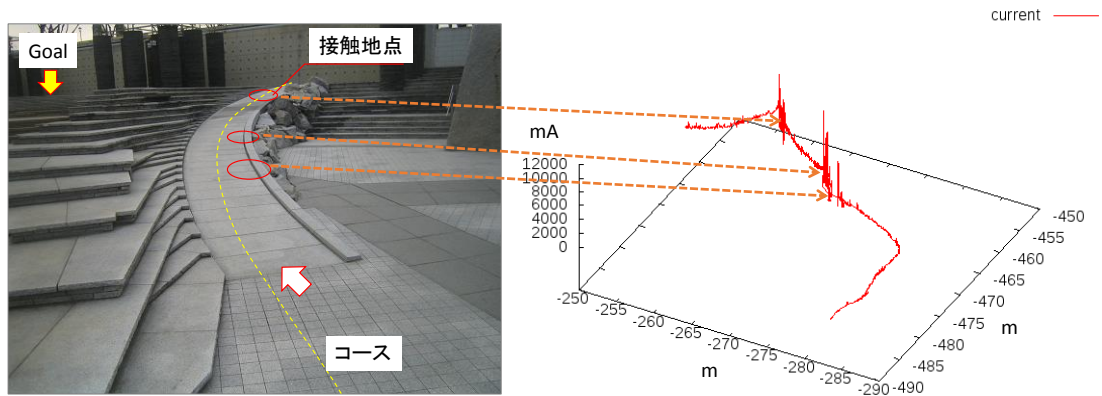


図 5.17 狭いスロープ端部の識別

#### Step4 再度接触が発生した場合、Step1 から繰り返す

本研究では、Step1 におけるロボットの後退距離を経験的に 1[m] に設定した。ウェイポイントとロボットの間段差が広範囲に及ぶ場合、接触を複数回繰り返す可能性があるが、自己位置推定が破綻しない限り、ロボットは段差から脱出することができる。

### 5.5.2 実験

ロボットが段差との接触によって走行可能領域を抽出し、自律走行を継続した例について述べる。つくばチャレンジ 2011 では、図 5.17 の右側の画像に示すとおりゴール手前に緩いカーブ形状の上り坂 (以下、スロープ) がコースとして設定された。周辺に建物の外壁があり、自己位置・姿勢の推定は可能であり、スロープ自体には左右端に 5[cm] 以下の縁石があった。この時点ではロボットに 3 次元測域センサが搭載されていなかったため、ロボットは非接触センシングによってスロープの形状を識別できない状況であった。ロボットにこのスロープを走行させる手法として、ロボットが正確な自己位置・姿勢の推定によってコースを追従することが考えられるが、わずかな誤差によってコースを逸脱する可能性がある。したがって著者は、図 5.16 に示したとおり、接触によって走行可能領域を識別し、走行を継続する手法をロボットに適用した。

図 5.17 の左側はロボットの走行軌跡と駆動輪の DC モータの電流値を表す。スロープは緩やかなカーブ形状のため、図 5.17 の右側に示すようにロボットはスロープを走行する過程で 3 回以上、縁石に接触した。その際に両方の駆動輪合わせて 10[A] 程度の大電流が流れ、駆動輪が接触する以前は 3[A] 程度であったのに対して急激な電流量の増加があった。そのため、ロボットは接触を検知して回避動作に移行し、ウェイポイントの方向に姿勢を修正した。このような過程を接触毎に繰り返し、ロボットはスロープを登りきることができた。

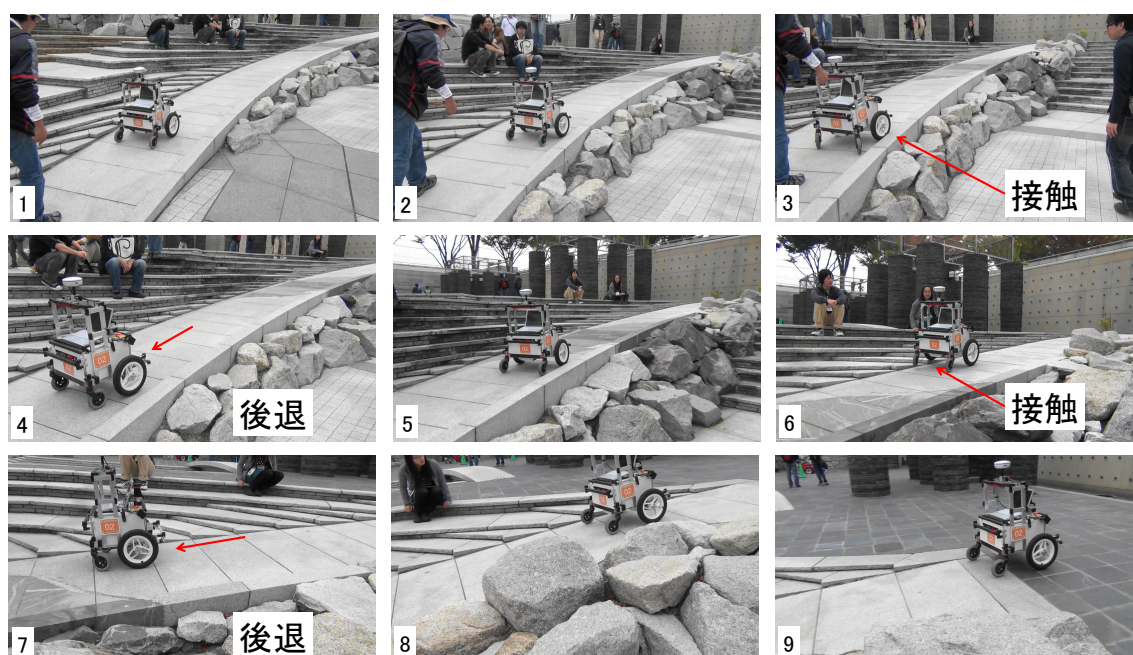


図 5.18 復帰動作によって狭いスロープを走行した例

## 5.6 まとめ

本研究では走行可能領域の識別に対して、その高さによって非接触センサ、および接触センサによって低所特徴を抽出する手法を構築した。非接触センサでは、実環境では路面の凹凸などによってロボットの姿勢が変化するため、単純な高さの計測では低い段差などの低所特徴と地面の区別が難しい。そのため、著者は低所特徴の識別において水平距離のちがいに着目した。これによって3次元測域センサで地面をセンシングしたときの Spot（レーザビームによる測距点）の水平距離をテーブル化し、それとの比較によって低所特徴を抽出する手法を構築した。その結果、目標とした高さ 5[cm] 以上の低所特徴を抽出することができた。一方で、非接触センサでは、落ち葉などとの区別が困難な地面との高低差が小さい低所特徴を、接触センサ、すなわち本研究では接触したときの駆動輪の電流値変化から抽出する手法を構築した。

以上より本章では、本研究で構築した非接触センサ、および接触センサによる低所特徴の抽出手法によって、ロボットの自己位置・姿勢の推定が破綻しない限り、ロボットが低所特徴を回避できることを示した。また、接触センサによる識別を応用した例として、両側に低い縁石のある狭いスロープの走行を示した。しかしながら一方で、一般市街地環境には、袋小路のような外界センシングでは識別できない走行不可能領域がある。そのような領域に対しては、人が事前に地図上で指示する対応が有効と考える。これについては第 7 章で述べる。

## 第6章

# 走行可能領域から逸脱しない走行制御

### 6.1 はじめに

一般市街地は変化が多い環境である。常時、歩行者や自転車が行き交っている。また、不定期的に経路上に看板が置かれ、街路樹の手入れなどの作業車両が停車される。自律移動ロボットが、このような環境で経路を逸脱することなく一定速度で走行することは現実的に難しい。つくばチャレンジ 2010 において Rahock は、ロボットが歩行者に対して回避行動をとったときに、ロボットが識別していなかった低い段差に接触し、リタイアした事例を報告している [75]。自律移動ロボットにおいて回避行動はリタイアのリスクを伴う動作である。著者はロボットが自律走行を継続するために行う回避動作は、ロボットが走行可能領域を識別した上で、経路からの逸脱を最小限に抑制する必要があると考えている。一方、事前に設定した経路は基本的に走行可能領域であるため、経路を逸脱しない限り安定した走行が持続できる。したがって本研究ではロボットの自律走行において、前方の経路上にいる歩行者や他のロボットに対しては、ロボットがそれらを回避せず、追従走行することで経路からの逸脱を抑制するアプローチをとる。一方で回避が必要な静止物に対しては、ロボットが、第5章で述べた手法によって識別した走行可能領域内に走行目標点を設定し、これに追従走行することで回避を達成する手法を構築する。以上より、本章では走行可能領域から逸脱しないための動作選択、および走行制御について述べる。

### 6.2 速度・角速度制御

#### 6.2.1 アプローチ

ロボットに経路を追従させる制御手法として軌跡追従制御が広く用いられている。飯田が提案した手法はロボットが走行目標とする直線上を走行させる制御手法である [77]。経路はウェイポイントを結ぶ線分で表現される。これらの直線を乗り換えることでロボットは進路を変更し、経路を追従走行する。制御の目標値として線分を定義すればよいため、目標値の更新頻度は比較的小さく、制御に要する CPU の処理負荷が小さくて済む。一方で直前の対象を回避する場合、軌跡追従制御では回避直線を生成して乗り換えることで実現される。しかしながら直線を乗り換える過程において、ロボットの位置・姿勢が直線上に収束するまでのオーバーシュートによって回避対象に接触する可能性がある。したがって本研究では、ロボットに目標速度と加速度を直接与えることで応答性の高い制御をねらう。すなわち、ロ

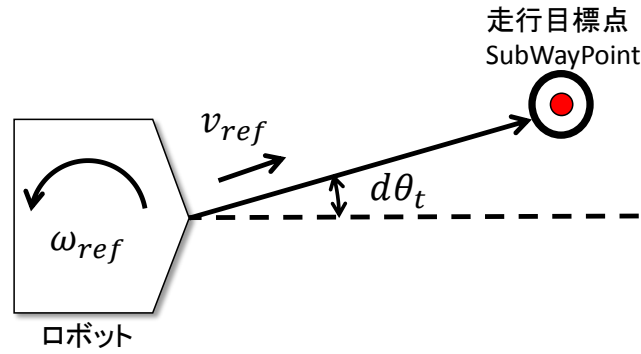


図 6.1 走行目標点

ロボットが走行目標点を設定し、これに向かって走行するように速度・角速度を制御することで経路追従、および回避動作を実現する。本手法では、ロボットが通常の経路上を走行する場合には走行目標点はウェイポイントと一致している。一方、回避動作などで経路を逸脱する場合には、対象を回避する方向に走行目標点を設定する。この制御手法では、ロボットは一定周期で目標速度・角速度を更新する必要があるため、比較的 CPU の処理負荷が高い。したがって CPU の処理能力に対して余裕をもたせたソフトウェア設計が必要である。

### 6.2.2 制御目標値の算出

走行目標点に追従するための時刻  $T$  における目標速度:  $v_{ref}$  および角速度:  $w_{ref}$  を、それぞれ、式 (6.1) および式 (6.2) に示す。目標速度:  $v_{ref}$  における  $V$  は、前方の歩行者やロボットなどとの距離によって設定される値であり、本章にて後述する。目標角速度:  $w_{ref}$  は、PI 制御によってロボットの姿勢と走行目標点 “SubWayPoint” の方向との差を 0 にするための目標値であり、 $k_p, k_i$  はそのゲインである。

$$v_{ref} = V \quad (6.1)$$

$$\omega_{ref} = k_p d\theta_T + k_i \sum_{t=0}^T d\theta_t \quad (6.2)$$

### 6.2.3 積分項のリセット

本研究に用いる自律移動ロボットの走行制御において、道路の勾配やカーブ形状によって式 (6.2) に示す角速度制御の積分項の増加量が増加する。上り坂が終わった後の平地では増大した積分項が悪影響を与え、ロボットの走行にふらつきが生じる場合がある。したがって、本研究では積分項に上限値を設定し、経路の勾配の変化点など環境の変化が大きいつきに 0 にリセットすることで対応することとした。なお、積分項をリセットするときは走行に影響が出ないようにするため、ロボットは一時停止することが必要である。

## 6.3 動作の設計

### 6.3.1 アプローチ

自律移動ロボットの実験走行から得た著者の知見より、ロボットが経路上にいる歩行者や他のロボットに対して回避行動を行った場合、かえってそれらの動きを乱す場合があることがわかっている。これまでに群集の中におけるロボットの回避行動の研究が行われてきた [76]。しかし 2015 年現在において、未だ歩行者にとってロボットは日常にない異質な存在であり、その回避行動は先の読めない動きといえる。例としてつくばチャレンジで見られた状況では、ロボットの回避行動が歩行者の動きを障害し、警戒心を抱かせてしまうことがあった。また、先述の Rahock のように、回避行動によって経路を逸脱した結果、識別できていない低い縁石などの物体に接触することがあった。ロボットの自己位置・姿勢の推定の観点からも、回避のための急な動きはランドマークとスキャンデータの誤マッチングを誘発する可能性がある。したがって本研究では、ロボットが検知した対象との相対位置、および経路との位置関係によって、ロボットが安全な動作を選択し、走行可能領域からの逸脱を抑制する走行制御を構築する。

### 6.3.2 対象の位置による動作の定義

本研究では、図 6.2 に示すように、ロボットが進行方向において回避対象を検知することとし、検知範囲をロボットの後側方を若干含んだ  $\pm 105[\text{deg}]$  に設定した。本研究では、特に経路上でロボットの前方 3[m] 以内かつ正面  $15[\text{deg}]$  の範囲で検知した対象を前方物体と定義する。一方、それ以外の対象を側方物体とする。

ロボットから見た検知対象の相対位置による動作の定義を図 6.2 に示す。本研究では、ロボットが検知した前方物体に対して、それが動いているか静止物かの判別はしない。そのため、経路上で検知した前方物体がロボットと同じ方向に動いている歩行者やロボットの場合、ロボットがそのまま追従することで経路からの逸脱が抑制される。一方、ロードコーンや看板などの静止物の場合、安全停止できる距離として設定している 1.5[m] 程度でロボットを一時停止させる。静止物が歩行者の場合、ロボットが自ら回避するよりも相手に回避してもらう方が安全である。しかしながら先述のとおり、ロボットは相手の種別を判別しない。したがって、ロボットは動く対象ならば前方距離に変化があると仮定し、一時停止中に前方物体を観測する。一定時間内に前方距離の変化がない場合、ロボットは前方物体を静止物と判断して回避動作を行う。一方、距離に変化があれば歩行者や他のロボットと判別する。その後、ロボットはそれらが経路上にいる場合には追従走行を再開し、それ以外は回避動作を行う。

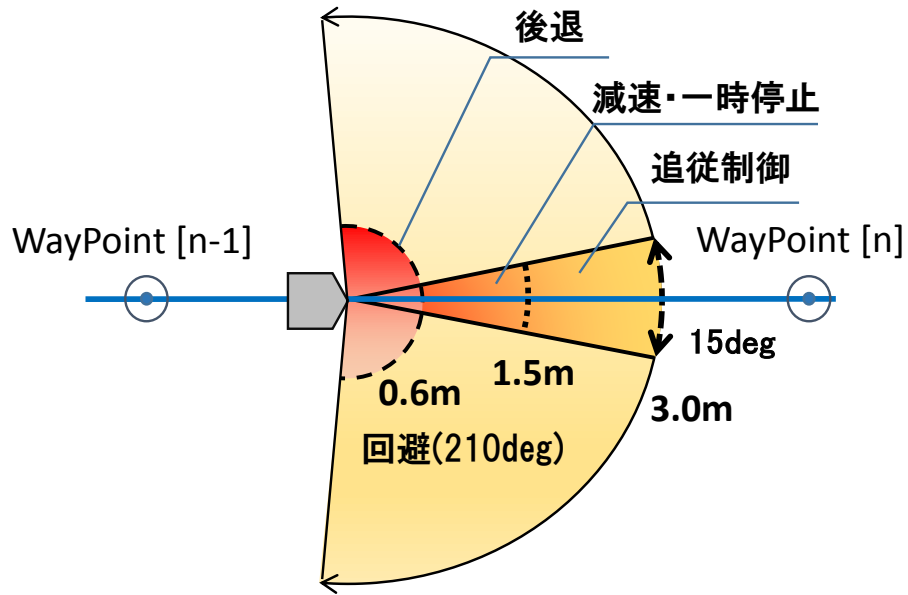


図 6.2 前方物体に対する動作の定義

### 6.3.3 到達時間制御による追従走行

本研究におけるロボットの、前方物体に対する動作の定義を図 6.2 に示す。本手法では図 6.2 に示すようにロボットが経路上を走行しているとき、ロボットが正面 (15[deg], 距離 3[m] の範囲) で検知した前方物体に対しては、ロボットの経路上を走行していると判別し、前方物体までの到達時間：“Time To Contact”を一定にする制御を実行する。この到達時間制御手法 (TTC 制御) は前方物体の速度によって追従するロボットとの距離が変化するが、到達時間が一定であることから高い安全性を確保することができる。すなわち追従対象への接触に対する安全のマージン確保と、追従対象と占有する空間の最適化を両立できることから交通の流れに対して適応性が高い。応用例として、自動車の Adaptive Cruise Control に用いられている [78]。

TTC を一定にするための目標速度  $V$  は、前方の追従対象までの距離を  $d$  として目標到達時間  $TTC$  より、下記のとおり式 (6.3) より算出される。本研究では安全に回避行動をとれる時間的余裕を重視し、 $TTC$  を 6[sec] に設定した。

$$V = d/TTC \quad (6.3)$$

### 6.3.4 回避動作

ロボットの回避動作は、その前方においてロボットが通過できる走行可能領域を探索する大島の手法を用いる [43]。本研究では、図 6.3 に示すように、第 5 章で述べた手法によって



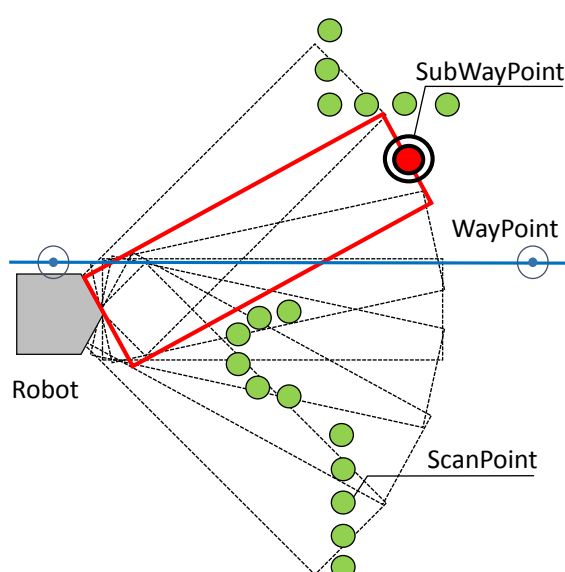


図 6.3 前方物体に対する回避手法

抽出した走行可能領域，すなわち 2 次元測域センサのスキャンポイント，および低所特徴を表す 3 次元測域センサのスキャンポイントが存在せず，ロボットが通過できる幅をもつ領域を探索する．その中でウェイポイントから構成される経路に最も近い位置に走行目標点を設定する．本研究では探索範囲の長さを先に述べた回避動作の定義と同等の 3[m] 以内とした．また，ロボットが余裕を持って通過できることから，探索範囲の幅を 1.0[m] に設定した．この手法は A\* アルゴリズムのような局所的な経路計画を必要としない．そのため，ロボットは検知した直前の物体に対して比較的早い対応が可能であるが，スキャンデータのノイズに影響される．したがって，特に低所特徴のノイズを除去しておくことが必要である．

### 6.3.5 直前の物体に対する動作

一般市街地環境において，歩行者や自転車の飛び出しは想定すべき事態である．したがって本研究では検知したロボットと前方物体との距離が安全停止距離 (1.5[m]) 以内になったとき，ロボットは経路上の他のロボットや歩行者との接触を避けるため，その場で一時停止する．それから走行可能領域を探索し，走行目標点を設定する．その後，ロボットは回避に要する空間を最小限に留めるため，走行目標点の方向にその場で回転して向きを変え，走行目標点を目指して走行することで回避動作を達成する．また，直前の急な飛び出しでロボットの 0.6[m] 以内に対象が接近した場合には衝突を回避するため，駆動輪をブレーキモードで急速に停止させる．その後 1[m] 程度後退し，回避動作を行う．



### 6.3.6 行列動作

エレベータや横断歩道の待ち状態において先に並んでいる人やロボットがいる場合、常識的にロボットはその後ろに並ばなくてはならない。すなわち「行列動作」が必要になる。本研究では、横断歩道やエレベータの手前など、事前に行列する場所を経路上に設定する。そして、ロボットの行列動作を基本的に追従制御の拡張で実現することとする。追従制御と異なる点は、ロボットが行列ゆえに前との距離を縮める必要がある。そのため、前方のロボットおよび歩行者との安全距離を 1.0[m] に設定し、これ以上接近しないようにした。

本手法は高精度な自己位置・姿勢の推定の上に成り立っている。そのため、それらに誤差が生じた場合、ロボットが横断歩道手前の車両進入止めのポールなど、本来の後ろに並ぶ対象とは異なる対象の後ろで行列動作に移行することがある。その場合はロボットがその場に留まり続けるため、ほぼりタイヤに等しい状態になる（この詳細は第 8 章で述べる）。したがって、本研究では、ロボットが行列する経路に進入する前に速度を落として自己位置・姿勢の推定精度を低下させないようにすることで対処した。また行列動作を維持する制限時間を 10[min] に設定し、これ以降は通常の回避行動を行うこととした。しかし、行列動作は本質的には行列の対象とする前方のロボットを識別する技術が必要であるため、今後の課題とする。

## 6.4 実験走行

本研究における TTC 制御による、前方の歩行者に対する追従走行の例を図 6.4 に示す。この場面は 2014 年 11 月 14 日に行われたつくばチャレンジ 2014 の記録走行で本ロボットが、前方を走行するロボットに随行していた他チームメンバに追従走行した状況である。図 6.5 に到達時間 “Time to contact”, 速度, およびスタート地点からの走行距離を示す。この図において走行距離 120[m] 程度まではロボットは 75[cm/s] の速度で通常に走行していた。120[m] 付近で前の歩行者に追いつき、減速して追従走行を開始した。その後、130[m] 程度まで TTC を 6.0[sec] に維持するように速度を調整しながら走行を継続した。130[m] を過ぎたあたりで歩行者が経路から離れたため、ロボットは歩行者に対する回避行動に移行した。その後通常の走行に戻り、75[cm/s] に速度を戻して走行を継続した。なお、本記録走行では、本ロボットはこの後ゴールに到達でき、自律走行で完走することができた。

## 6.5 まとめ

本章では実環境においてロボットが走行可能領域からの逸脱を抑制し、自律走行を持続するための走行制御手法について述べた。事前にロボットに与えられた経路は最も基本的な走行可能領域である。本研究においてロボットはこの経路からの逸脱を抑制することでリタイヤのリスクを低減することとした。よって著者は、ロボットの走行可能領域からの逸脱を抑

制するため、走行経路上にいる歩行者や他のロボットに対して追従することとし、それらに対する到達時間“Time To Contact”(TTC)を一定にする速度制御を構築した。この手法の利点として、立ち止まった歩行者に対してロボットが減速して最終的に停止するため、歩行者に警戒心を抱かせる可能性が小さく、親和性が高い。一方、経路外の対象に対しては走行可能領域内に走行目標点を設定し、回避することとした。また、一般環境でロボットに求められる動作として「行列」がある。例としてつくばチャレンジ2015では横断歩道を渡る直前で安全確認のため、ロボットが行列に加わって並んで待つことが求められた。そのため、本研究ではTTC制御を応用して行列動作を構成した。しかし、横断歩道手前の車両進入止めのポールを誤識別してその後ろに並んだ場合、リタイアとなってしまいう問題が明らかになった。これについては、センシングした対象の種別を識別する技術が必要であるため、今後の課題とする。以上の技術構築によって、ロボットが走行可能領域から逸脱することを抑制し、安定した自律走行を継続できることを示した。

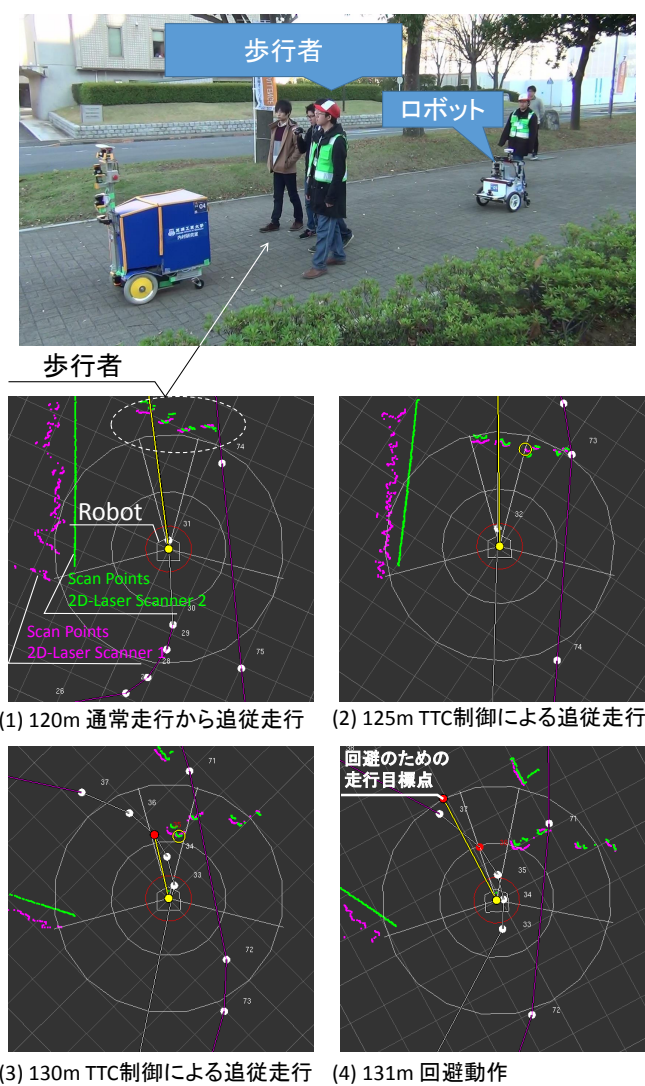


図 6.4 前方の歩行者に対する追従走行の例

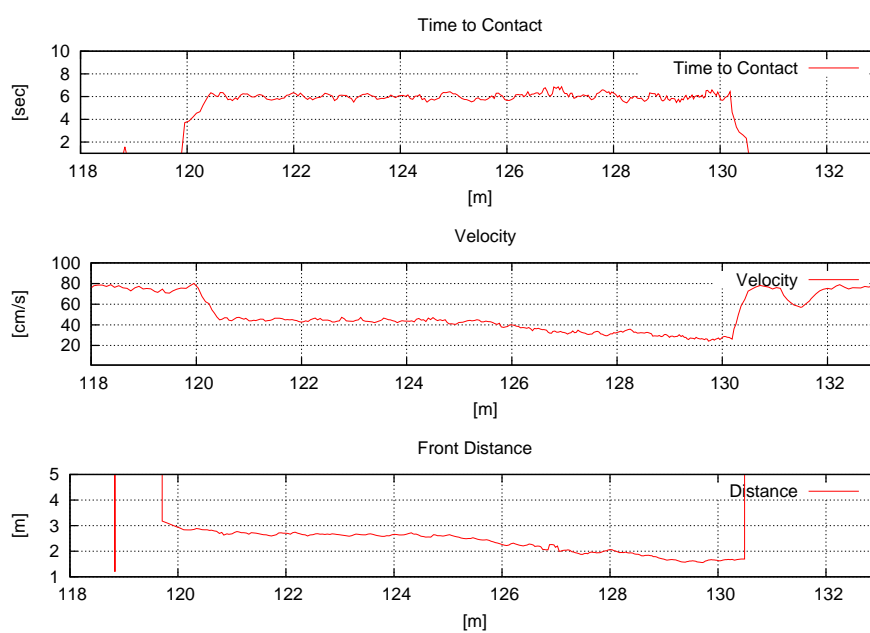


図 6.5 TTC 制御

## 第7章

# 環境情報地図の構築

### 7.1 はじめに

本研究では、これまで述べたとおり自律移動ロボットは基本的に事前に設定した経路上を走行する。一方でタスクの実行や回避行動などでロボットが経路を逸脱する場合、進行方向の走行可能領域を識別して新たに経路を設定する必要がある。本研究では自律走行の確実性を重視し、走行可能領域を識別するために環境中の低所特徴を占有格子地図に付加することで対応する。しかし、一般市街地ではロボットにとって走行可能領域かどうか、識別することが難しい領域が存在する。その一例として袋小路がある。このような領域においてはロボットが、入り口では走行することができるが、その先は元の経路につながっていないため、それ以上の走行ができなくなる。ロボットが走行の継続ができない領域であることを識別し、元の経路に復帰する経路を生成できない限り、そこから脱出することが難しい。また駐輪場のように、安全のためにロボットの進入を抑制すべき領域もある。ロボットの安定した自律走行を実現するには、このような局所的な「走行不可能・禁止領域」の情報が必要となるため、本研究ではロボットに対して事前に人が与えることで対応することとした。したがって、本研究では図 7.1 に示すように、これらの環境情報を占有格子地図上に重ねた階層型の地図を構成する。これを本研究では「環境情報地図」と定義する。環境情報地図によってロボットが自律走行時にその位置の情報を取得し、その場で最適な動作を選択することができる。また、人が机上でロボットの経路を修正することもできるため、環境の変化に対して短時間で新たな経路を設定できる。このように環境情報地図を自律走行のためのデータベースとして活用することで、自律移動ロボットによるサービスの適用範囲の拡大が期待できる。本研究における環境情報地図の構成は下記のとおりである。

#### 1. ウェイポイント

ロボットの走行経路を表現した階層である。走行環境の変化などの必要によって、人が適宜修正する。

#### 2. 低所特徴

背の低い段差や低い縁石などの低所特徴を表現した階層である。第 5 章で述べた手法により識別した段差や縁石を表現する。

#### 3. 走行不可能・禁止領域

ロボットがセンシングできない走行不可能領域、および走行を抑制すべき領域を定義

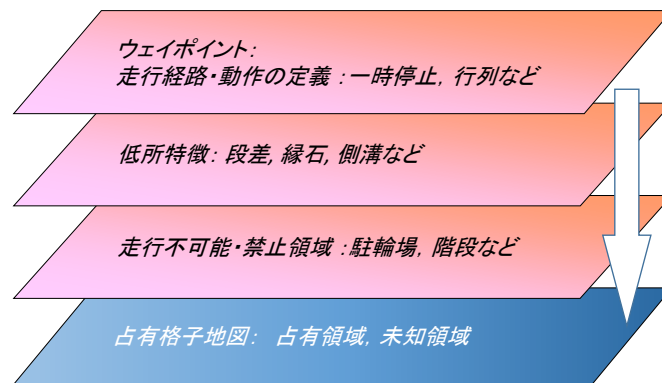


図 7.1 環境情報地図の階層構成

する階層である。袋小路領域や駐輪場などロボットが侵入するとリタイアする可能性が高い領域、すなわち、経路の逸脱を抑制する領域を表現する。

#### 4. 占有格子地図

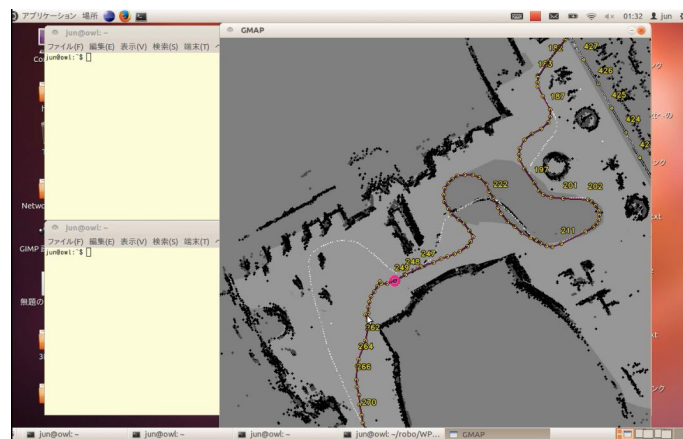
第 4 章で述べたとおり，空間の有限の格子に分割し，各格子に対して 2 次元測域センサによって観測した建物や設置物などのランドマークによる占有または非占有を表現した地図である．ロボットが自律走行時に，第 4 章で述べた自己位置・姿勢の推定手法に用いる．その結果によってロボットは上記の各環境情報を参照する．

## 7.2 環境情報地図の構成

ロボットは環境情報地図から得た情報からその場所での動作を決定する．本節では，占有格子地図に基づく環境情報地図の構成について述べる．

### 7.2.1 ウェイポイント

本研究においてロボットの初期の経路は占有格子地図作成時の走行経路である．経路は複数のウェイポイントより構成され，その間隔は経験則から直線区間では 5[m] とした．また，50[msec] のサンプリング間隔の前後でロボットの姿勢が 60[deg] 以上変化する，進路が大きく変化する区間では経路の逸脱を抑制するため，ウェイポイントを 15[deg] 刻みに設定した．先述のとおり一般市街地の遊歩道では，事前に設定した経路が作業車両や露店によって走行できなくなることがある．ロボットが動的に経路を再設定できることが望ましいが，環境によっては測域センサの測定距離が十分ではないため，現実的には全ての環境で自律的に経路を再設定することは難しい．したがって，経路上が走行できないことが事前に判明している区間については人が経路を修正し，ロボットに与えることで対応する．そのため，本研究では地図上でウェイポイントを編集する GUI ツール “WayPointEditor” を作成した．

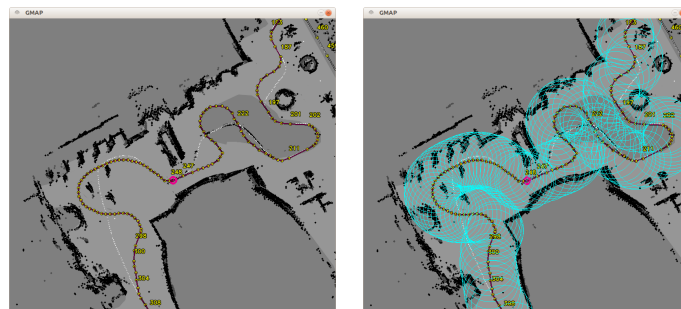


デスクトップイメージ



1. 現在の経路を表示

2. 修正経路を入力



3. 既存の経路を削除

4. 探索範囲を確認

図 7.2 WayPointEditor

“WayPointEditor”は既存のコースに対してユーザ操作により部分的に経路を変更する。また、探索対象人物の探索範囲を確認するため、コースに沿って探索範囲を表示する。図 7.2 に操作の様子を示す。経路の修正手順は下記のとおりである。

1. 現在の経路を表示
2. 修正経路を入力
3. 既存の経路を削除
4. 探索範囲を確認

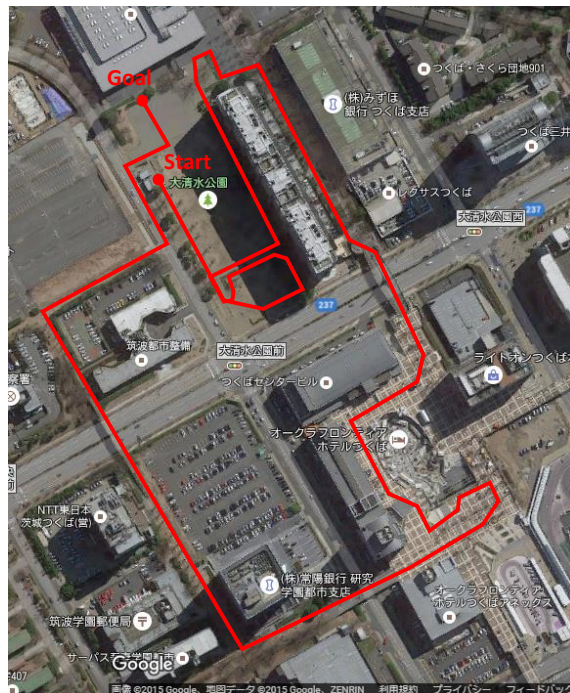


図 7.3 つくばチャレンジ 2015 の課題コース

一般的に占有格子地図の作成には、走行経路を 1 回以上ロボットを走行させて環境のスキャンデータ、およびオドメトリデータを取得する必要がある。したがって地図の範囲が大きくなるほど多くの時間と労力を要するため、一度作成した地図は再利用できることが望ましい。本研究では、この“WayPointEditor”によって経路を編集できるようにしたことで、占有格子地図の再利用性が高めることができた。

### 7.2.2 低所特徴

2015 年 7 月 4 日に行われたつくばチャレンジ 2015 の第 1 回実験走行会にて取得した 3 次元測域センサのデータより、著者は第 5 章で示した手法によって低所特徴を抽出し、環境情報地図に付加した。その結果を以下に示す。ロボットと低所特徴の接触を回避するためには、その相対位置関係をより高い精度で推定することが有効と考える。このことから本研究では低所特徴を自己位置・姿勢の推定に用いる。

図 7.3 に示すつくばチャレンジ 2015 のコースに対して、2 次元測域センサのスキャンデータ、および 3 次元センサによって抽出した段差を描画した占有格子地図を図 7.4 に示す。この地図は第 4 で述べた手法によって作成した [72]。本研究では占有格子図はビットマップ画像として構成されており、各ピクセルの値が、各測域センサのセンシングから得られたランドマークによる占有を表す。図 7.4 において、3 次元測域センサのスキャンデータに対して“Red point”が平面テーブルより抽出した低所特徴を示す。一方、“Yellow point”が高さの変化量から抽出した低所特徴を示す。以下、実験走行により課題コースの複数個所で抽出し



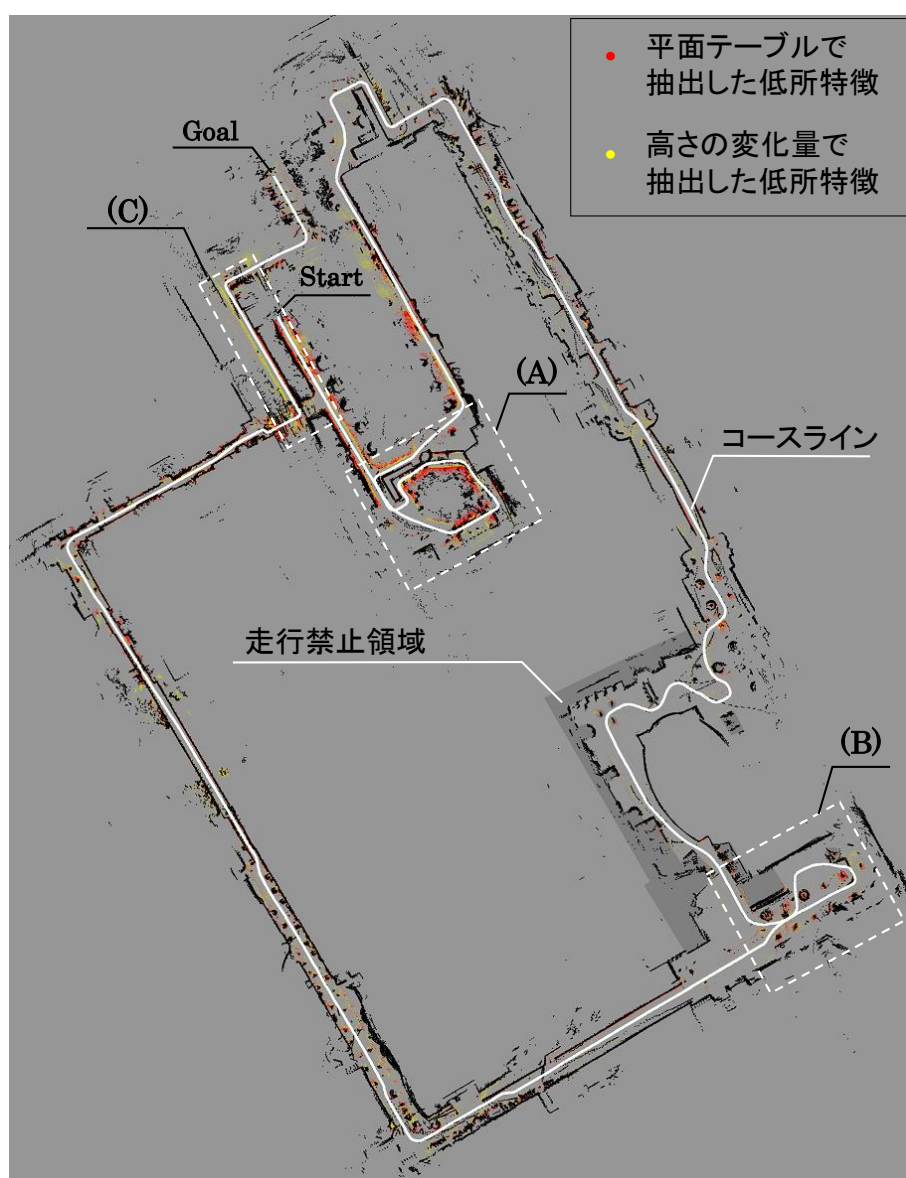


図 7.4 つくばチャレンジ 2015 の課題コースにおける環境情報地図

た低所特徴について考察する。

### 公園の芝生

図 7.4 の Area(A) に示す公園の芝生の周辺領域を図 7.5 に示す。図 7.4 (a) に示す領域では、特にロボット右側の芝生領域の境界部分が抽出されている。また、図 7.4 (b) に示す領域では周囲にランドマークとなる建物などが少ないため、2次元測域センサのみでは自己位置・姿勢の推定の精度と安定性が低下する可能性がある。これについては後述する。

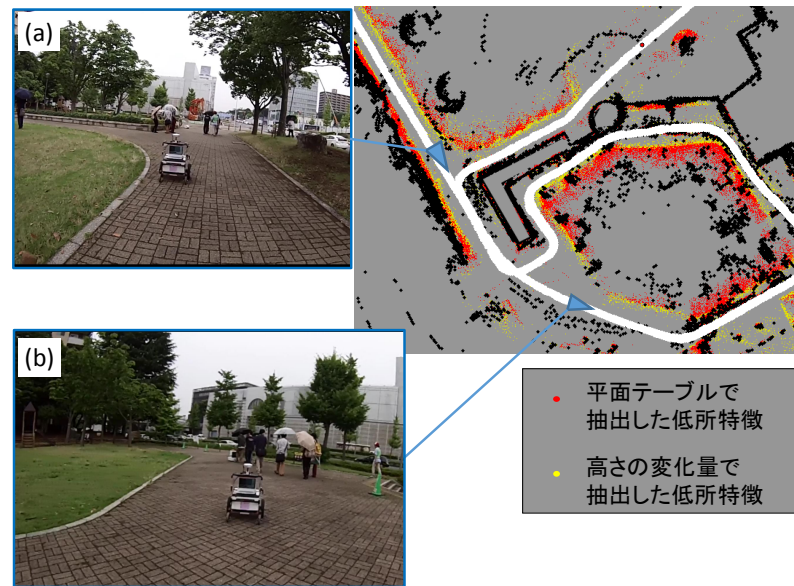


図 7.5 Area (A). 大清水公園における低所特徴の抽出

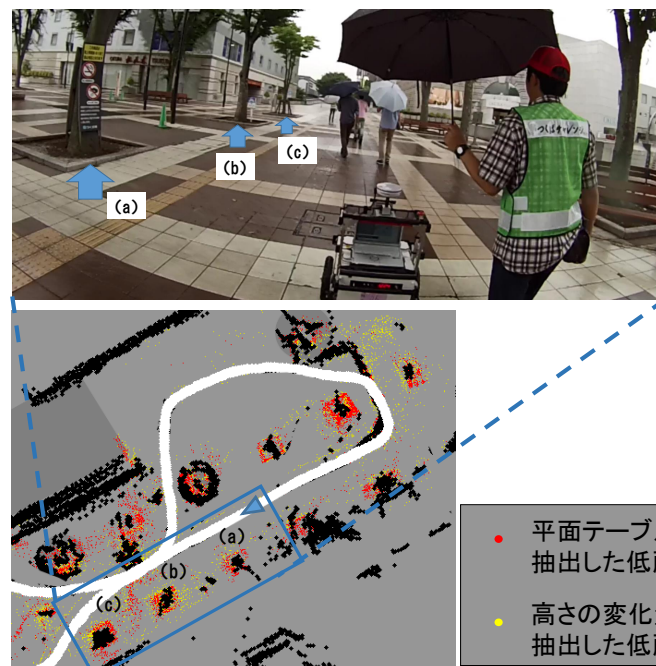


図 7.6 Area (B). つくばセンターにおける低所特徴の抽出

### 縁石

図 7.4 の Area(B) を図 7.6 に示す. この図において, (a)-(c) に示す街路樹を囲む縁石はセンシングによる抽出が難しく, これまでのつくばチャレンジで多くのロボットのリタイヤの原因となった [73]. 高さは最大で 8[cm] 程度であるが, 場所によっては 5[cm] 以下となり, 地面との識別が難しい. 図 7.6 下の占有格子地図上に示す縁石の抽出結果を示す. 平面テーブル (“Red point”) では, この領域の縁石が抽出されている. また, ノイズが生じているが,

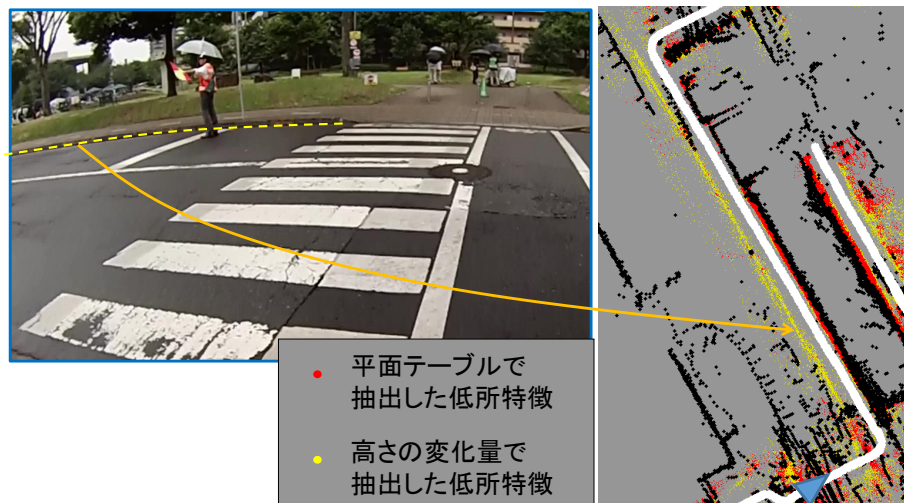


図 7.7 Area (C). 一般歩道における低所特徴の抽出

ロボットの姿勢変化などで瞬間的に生じたものであり、走行には大きく影響しない。一方、高さの変化量 (“Yellow point”) によってもこれらの縁石は抽出されているが、ノイズが平面テーブルと比較して多い。

#### 歩道端

図 7.4 の Area(C) を図 7.7 に示す。この図は一般道の歩道端の抽出結果を表す。図の左側の破線に示した部分を抽出した結果が右側の占有格子地図に表されている。歩道の下段差部分は高さの変化量 (“Yellow point”) によって正確かつ十分に抽出されている。

### 7.2.3 走行禁止領域

つくばチャレンジの課題であるロボットによる人物探索において、本研究ではロボットは2次元測域センサの受光強度によって対象人物を検知するが、環境中には対象人物の他にも受光強度が高い物体が多数あるため、多数の誤検知が発生する(検知手法の詳細は後述する)。誤検知が多い領域の例として駐輪場がある。ここにロボットが進入した場合、駐車している自転車に阻まれて、ロボットが元の経路に復帰することが難しくなる。この対策として、本研究では誤検知しやすいことが事前に判明している領域を、人が地図上で走行禁止領域に設定する<sup>1)</sup>。図 7.4 に、つくばチャレンジ 2015 の課題コースにおける走行禁止領域を示す。ロボットは、走行禁止領域に指定された領域では対象事物の探索を行わず、経路を逸脱しないように走行する。

<sup>1)</sup> 走行禁止領域領域は人手によって地図上の領域を、走行禁止領域として定義した輝度値で直接塗りつぶすことで設定する。



図 7.8 外界センシングでは識別できない低所特徴

#### 走行不可能領域

一般市街地環境には複雑な形状により、乗り越えることができるが、その後の走行が困難となる、いわゆる袋小路のような領域が局所的に存在する。このような領域は外界センシングでは識別できない。その例を図 7.8 に示す。この樹木を囲む縁石と路面の高低差は 3[cm] 程度であり、ロボットが乗り越えることができる高さであることから、3次元測域センサで識別する低所特徴には該当しない。しかし、ロボットがその先の縁石の内部に進入すると、その先は乗り越えられない高さであるため、それ以上の走行継続ができなくなる。課題タスクとして設定された探索領域以外では、ロボットの管理者が走行経路をこのような領域を通過しないように設定すればよい。しかしながら、領域の探索などロボットが自律的に経路を設定する場合には、このような領域を識別し、自律的に回避する必要がある。したがって、本研究ではこのような外界センシングでは識別が難しい領域を環境情報地図上で「走行不可能領域」に指定することで、ロボットに回避させることとした。本研究では走行不可能領域の表現として、その周辺の街路樹など、2次元測域センサで観測可能なランドマークを人手によって事前に指定することとした。走行不可能領域の回避は第 6 章で述べた前方物体の回避手法を用いる。すなわち、ロボットが 2次元測域センサによってそれらのランドマークをセンシングしたとき、走行不可能領域に擬似的なスキャンポイントが生成されることで、ロボットが走行不可能領域を回避する。擬似スキャンポイントの生成例を図 7.9 に示す。

### 7.3 環境情報地図を用いた実験走行

つくばチャレンジの実験走行において、環境情報地図に付加したそれぞれの環境情報による有効性について考察を述べる。



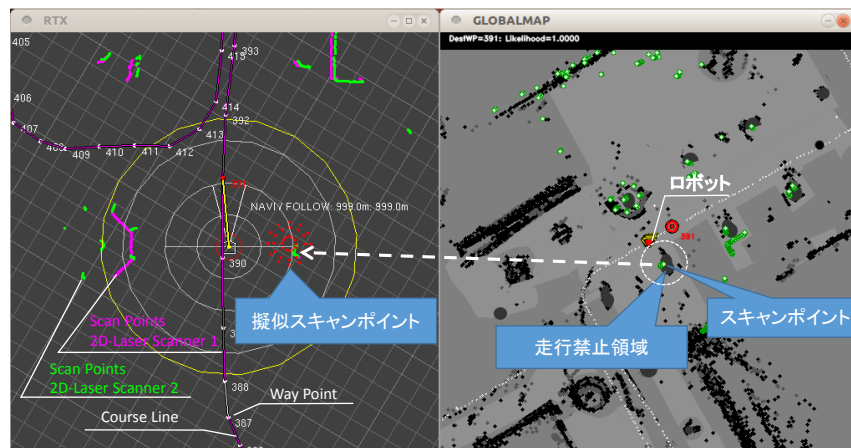


図 7.9 擬似スキャンポイントの生成例

### 7.3.1 低所特徴を用いた自己位置・姿勢の推定

#### 外乱に対する安定性の評価

著者は占有格子地図の元になったジャイロオドメトリに対してノイズを付加した状態でオフラインで走行再現実験を行い、そのときの Monte Carlo Localization による自己位置・姿勢の推定結果を比較した。ノイズはロボットの姿勢に対して  $\pm 5.0[\text{deg}]$  の範囲で与えた。自己位置・姿勢の推定に対して、低所特徴を用いなかった場合を図 7.10 (a) に示す。図で示す“White Line”はコースである。図中の“Error”に示す区間で走行軌跡に大きな誤差が生じた。実際の走行ではコースの逸脱に相当し、左側の芝生を走行している状態である。一方、自己位置・姿勢の推定に低所特徴を用いた結果を図 7.10 (b) に示す。全体的に誤差が小さく、コースの逸脱は生じなかった。以上より低所特徴を自己位置・姿勢の推定に用いることで、外乱に対して安定性が向上することが確認できた。

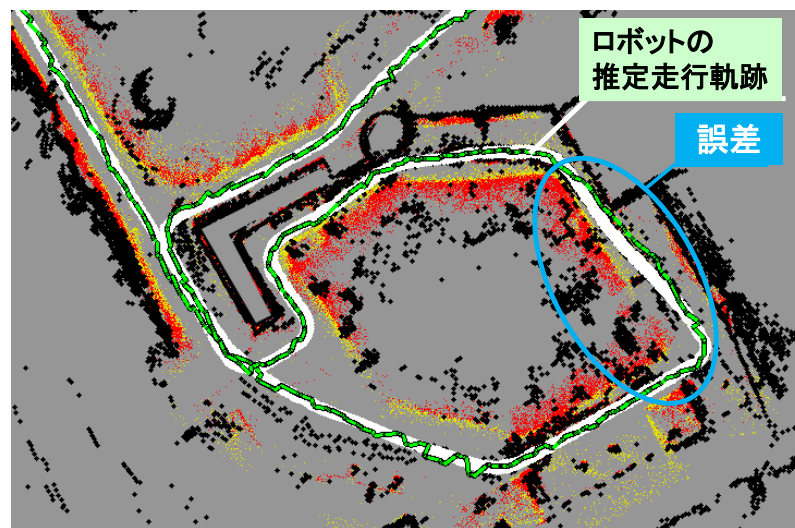
#### 実験走行

つくばチャレンジ 2015 の 10 月 17 日の第 4 回実験走行会において、環境情報地図の低所特徴を用いた自己位置・姿勢の推定の有効性を検証した。その手法は次のとおりである。

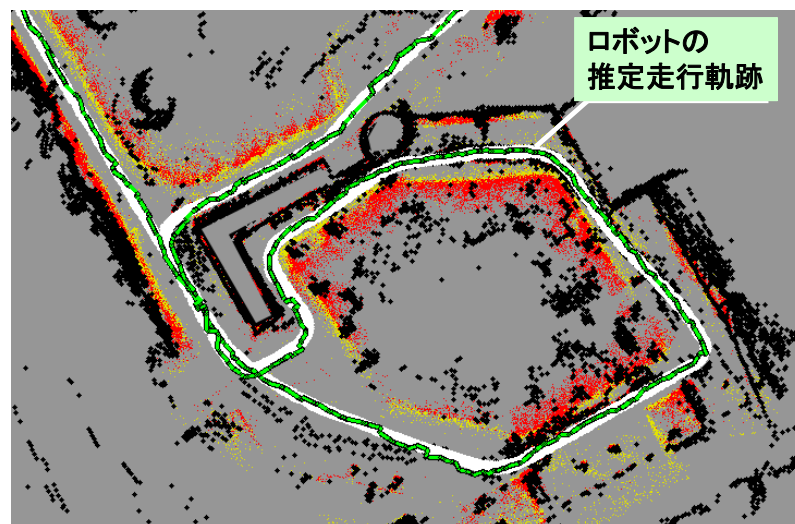
第 4 章で述べた占有格子地図と 2 次元測域センサのスキャンデータのマッチングによる自己位置・姿勢の推定手法<sup>2)</sup>に対して、低所特徴による自己位置・姿勢の推定を加えて実験走行を行った。ここで再度説明するが、本研究では第 4 章 4.6 節で示したように、自己位置・姿勢推定を安定性によって評価する。それには、スキャンデータ (2 次元測域センサのスキャンデータ、および 3 次元測域センサによる低所特徴の抽出結果) と、環境情報地図との非マッチング率を用いる。

実験走行の結果を図 7.11 に示す。この図において非マッチング率を円の大きさと表す。

<sup>2)</sup> Monte Carlo Localization



(a) 低所特徴を用いない自己位置・姿勢の推定



(b) 低所特徴を用いた自己位置・姿勢の推定

図 7.10 自己位置・姿勢の安定性の比較

- Red の円: 占有格子地図のランドマーク
- Green の円: 環境情報地図上の低所特徴

図 7.12 にランドマークと低所特徴の非マッチング率と、ランドマークと低所特徴の非マッチング率の差を示す。これらの正の差が大きいほど、自己位置・姿勢の推定に対して低所特徴による寄与が大きい。

著者は実験走行で行った自己位置・姿勢の推定について顕著な特徴を示した以下の区間より、自己位置・姿勢の推定における低所特徴の有効性を考察した。

### 7.3 環境情報地図を用いた実験走行

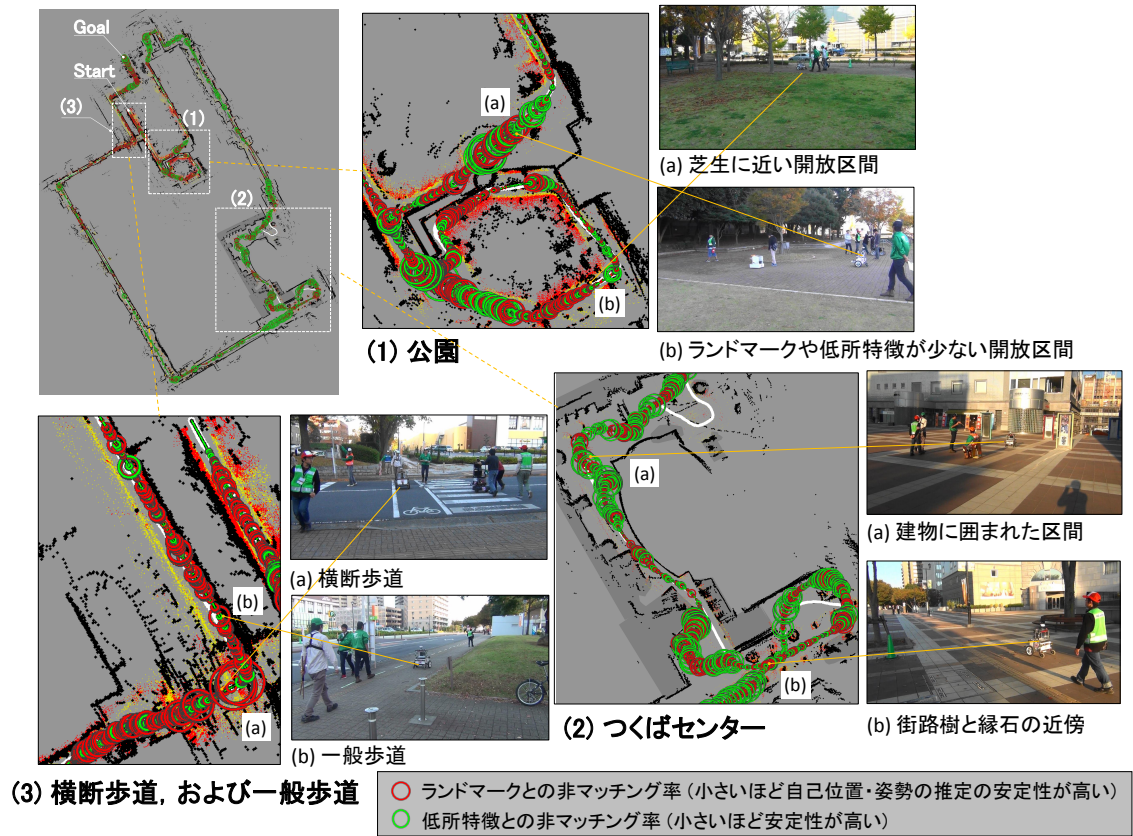


図 7.11 ランドマークと低所特徴を用いた自己位置・姿勢の推定

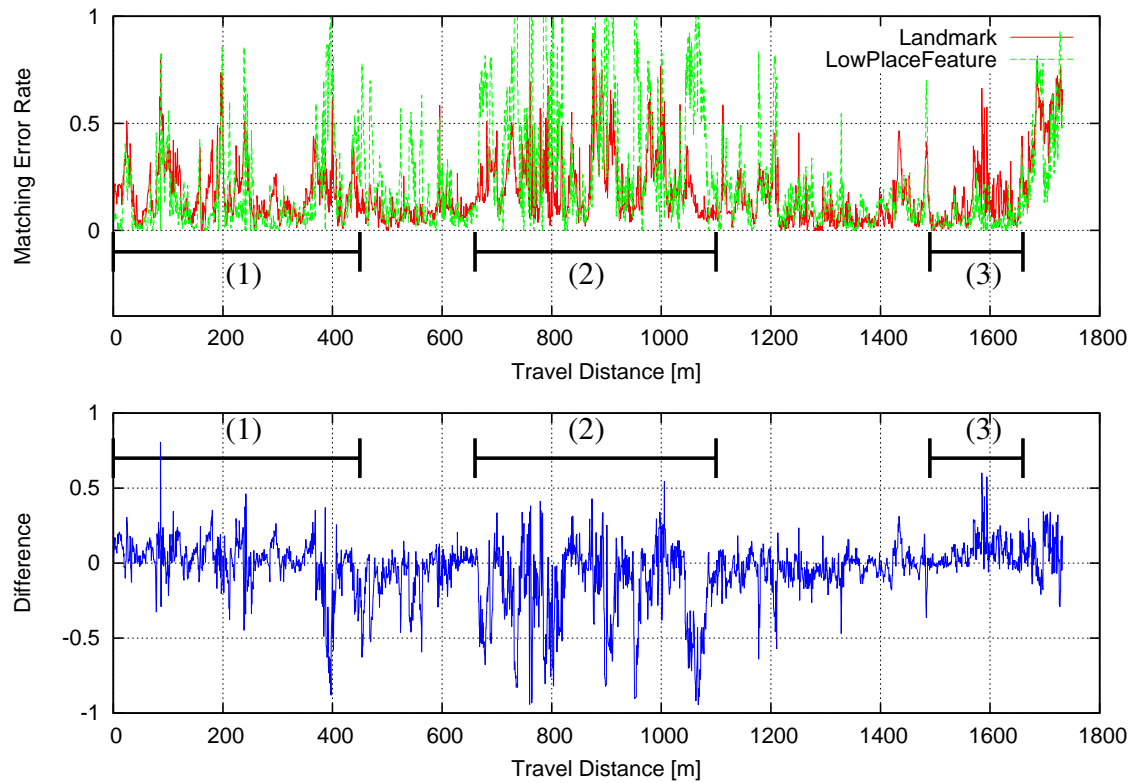


図 7.12 ランドマークと低所特徴の非マッチング率



## (1) 公園

図 7.11 (1)-(a) に示す区間は周囲にランドマークが少ない区間である。そのため、図 7.12 の (1) に示すとおり 2 次元測域センサのスキャンデータと占有格子地図のマッチングが十分でなく、非マッチング率が大きくなった。一方、ロボットは歩道と芝生領域の境界を低所特徴として抽出しているため、低所特徴の非マッチング率は小さくなった。これはこの区間において低所特徴が安定した自己位置・姿勢の推定に効果的であることを示している。一方、図 7.11 (1)-(b) に示す開放区間のロボットの走行経路は芝生から離れていることから、低所特徴よりもランドマークのマッチングによって自己位置・姿勢の推定の安定性が維持されている。

## (2) つくばセンター

図 7.11 (2)-(a) に示す区間は、ランドマークとなる建物に囲まれていることから、自己位置・姿勢の推定の安定性がランドマークとのマッチングによって維持できている。また、ランドマークおよび低所特徴の両方の非マッチング率の変動が大きい。その理由は、課題タスクである人物探索によってロボットが頻繁に進行方向を変えたことで、一時的に非マッチング率が高くなったためである。

図 7.11 (2)-(b) では、先述のとおり街路樹を囲む縁石が低所特徴として抽出されている。このため図 7.12 に示すとおり、この区間における低所特徴の非マッチング率が比較的低くなっている。これは縁石を用いた自己位置・姿勢の推定の安定性が高いことを示しており、縁石との接触のリスクを低くすることに効果的と考えられる。

## (3) 横断歩道、および一般歩道

図 7.11 (2)-(a) に示す横断歩道では、車道であることから周囲にランドマークが少ないため、自己位置・姿勢推定の安定性が低い。しかしながら、ランドマークが観測できない区間は 10[m] 程度であること、および横断歩道は直線であることから走行軌跡の誤差は比較的小さい。

図 7.11 (2)-(b) に示す歩道では、図 7.12 (3) に示すとおり、この区間のランドマークの非マッチング率が高くなっている。これは進行方向に対してロボットの右側が斜面であることから、ランドマークによる自己位置・姿勢の推定精度と安定性が低下するためである。

一方、低所特徴として図 7.7 に示したとおり、ロボットの左側にある歩道端が比較的精度よく抽出できている。このため低所特徴の非マッチング率が低く、ほぼ一定値となっている。したがってこの区間ではランドマーク (右側斜面) よりも低所特徴 (歩道端) による自己位置・姿勢の推定の寄与が大きい。

以上より、自己位置・姿勢の推定においてランドマークに加えて低所特徴を用いることによって、より多くの市街地環境で安定性を高く維持できる。

### 7.3.2 環境情報地図による回避動作

ロボットが図 7.8 に示す縁石を、走行不可能領域として生成された擬似スキャンポイントによって回避した例を図 7.13 を用いて説明する。2014 年 11 月 5 日のつくばチャレンジ 2014 実験走行会において、ロボットが探索対象人物を検知し、アプローチに成功した。その後コースに復帰する際に、ロボットは識別できなかった袋小路状の領域（以下、走行不可能領域）を走行しようとしたが、著者が事前にこの周辺を走行不可能領域に設定したことで生成された擬似スキャンポイントに阻まれ、ロボットは縁石に接触する前に停止した (図 7.8 (1))。その後、後退し (図 7.8 (2))、通常の回避動作同様に擬似スキャンポイントを回避しようとしたが (図 7.8 (3)(4))、回避するための走行可能領域が十分ではないと判断し、再度一時停止して後退した (図 7.8 (5)(6))。その後、ロボットは再度回避動作に移るが、姿勢の誤差によりスキャンポイントが走行不可能領域から外れたため、擬似スキャンポイントが消えた。そのため、再び走行不可能領域に進入しようとした (図 7.8 (7))。ここでは姿勢の誤差が小さく収まっており、擬似スキャンポイントが復活したため、再度一時停止した (図 7.8 (8))。その後、また一時後退し、姿勢をウェイポイントの方に向け ((図 7.8 (9)(10))、通常の回避動作によって擬似スキャンポイントの回避することで縁石の回避に成功した (図 7.8 (11)(12))。その後、ロボットはコースに復帰し、ゴールに到達することができた。

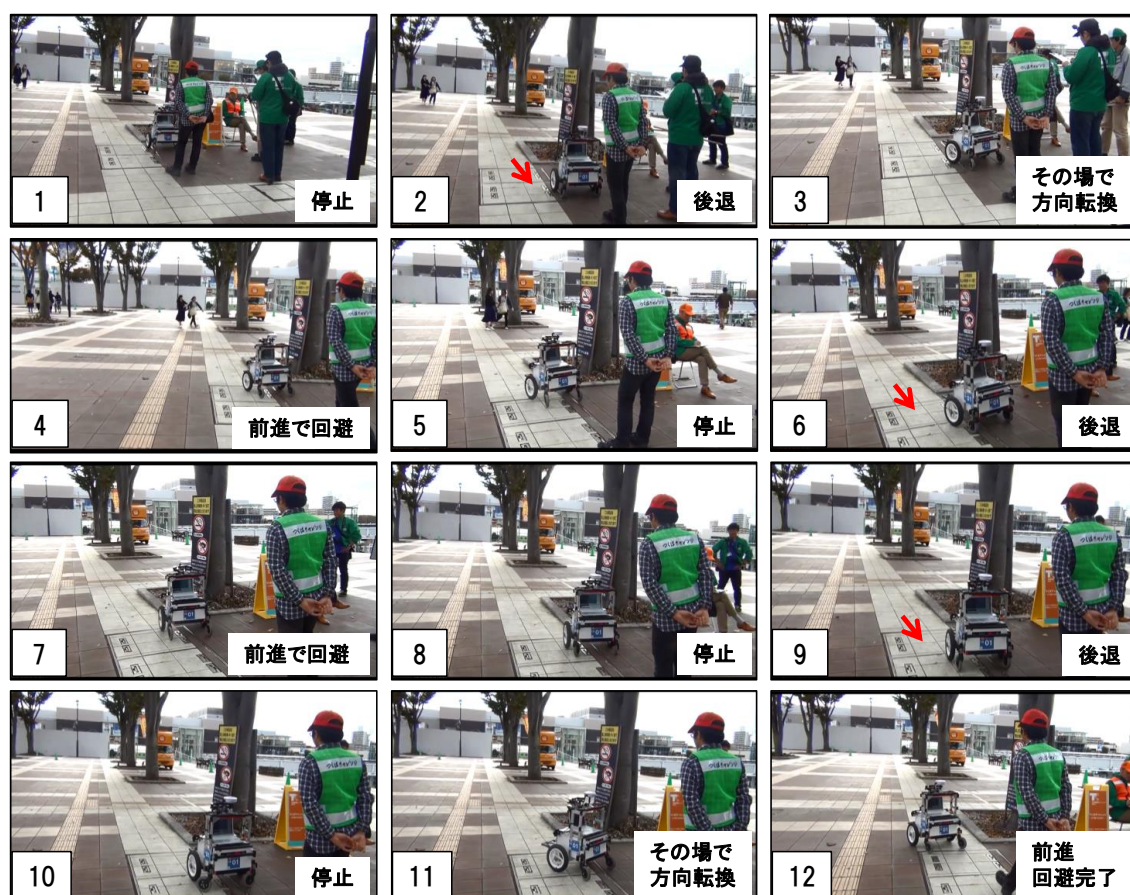


図 7.13 外界センシングでは識別できない低所特徴の回避例

### 7.3.3 課題タスクとしての対象人物の探索

つくばチャレンジ 2013 以降の課題タスクとして設定された対象人物の探索は、対象人物を検知して、1.5[m] 以内に接近・停止することが求められる。この課題の本質は、ロボットが自律的に経路を逸脱して探索対象まで経路を設定し、アプローチする技術を構築することである。それには正確に走行可能領域を識別する必要がある。一方、探索対象の識別自体は自律移動技術との関わりが小さいことから、本研究では非常に単純な手法として 2 次元測域センサの受光強度を用いることとした。この手法は多くの誤検知が発生するが、走行可能領域を識別し、自律的に経路を設定する自律走行を評価するのに適しているため、許容することとした。しかしながら一方で、店舗の入り口や往来の真中など明らかに探索対象が存在しない領域にロボットがアプローチすることは、市民に対する親和性の観点に問題がある。したがって、明らかに探索対象人物が存在しない領域を走行禁止領域に設定し、誤検知による経路の逸脱を抑制することで安定した自律走行を行うこととした。以下、環境情報地図を用いた探索対象人物へのアプローチについて述べる。

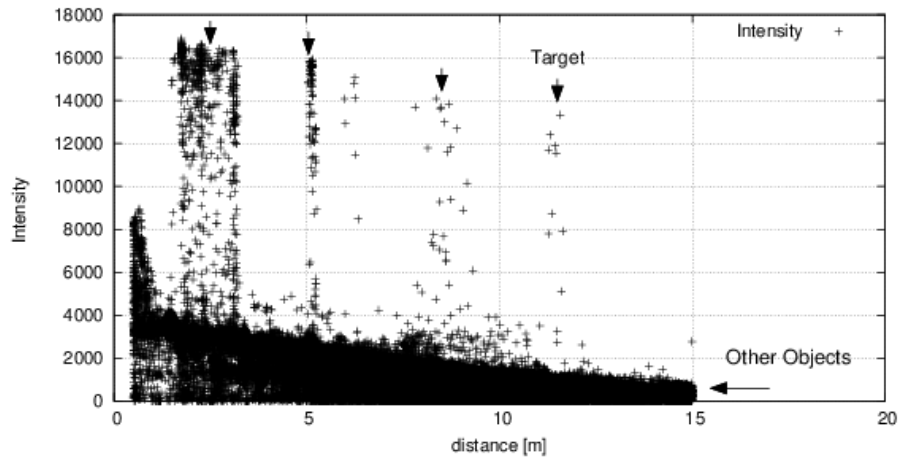


図 7.14 2次元測域センサの受光強度

#### 対象人物の検知手法

対象人物の検知に対して、本研究では2次元測域センサのレーザビームの受光強度に着目し、ロボットは対象人物の反射ベストまたは看板に貼られた反射テープを検知する。探索対象人物にアプローチするためには周囲の環境もセンシングする必要があるため、2次元測域センサの最大測定距離の30[m]に対して、探索距離を十分なセンシングデータが得られる12[m]に設定した<sup>3)</sup>。また、探索範囲はロボットの前で行うことから $\pm 90[\text{deg}]$ とした。つくばチャレンジ2010における受光強度の計測例を図7.14に示す。探索対象人物は周囲の物体と比較して、3倍以上の強度を持ち、距離による減衰が小さいため、しきい値を一定値に設定した。

#### 走行禁止領域の設定による誤検知の低減

つくばチャレンジ2013において図7.15に探索対象人物を検知した状況を示す。左側の図がスキャンポイントを示し、反射強度を高さとして表している。右側が占有格子地図とロボットの位置を示す。このケースでは探索対象人物を背後から検知しているが、周囲と比較して大きな反射強度を持っていることがわかる。これによって、本手法によって対象人物の手前に走行目標点が設定されている。

一方、受光強度による検知では環境中には対象人物以外にも強い反射物は数多く存在し、誤検知が数多く発生する。その一例を図7.16に示す。ロボットの両側に駐輪場があり、自転車が高い反射強度を示している。対策として、誤検知しやすい場所が事前に判明している領域を占有格子地図において走行禁止領域に設定する。この領域内で誤検知による経路の逸脱を抑制することで、安定した自律走行を継続させる。

<sup>3)</sup> 2次元測域センサによる計測可能な距離は対象の反射率によって異なる。反射率が高い白色のものは30[m]の距離で検知可能である。一方、反射率の低い黒色のものは、計測距離が15[m]程度に低下する。

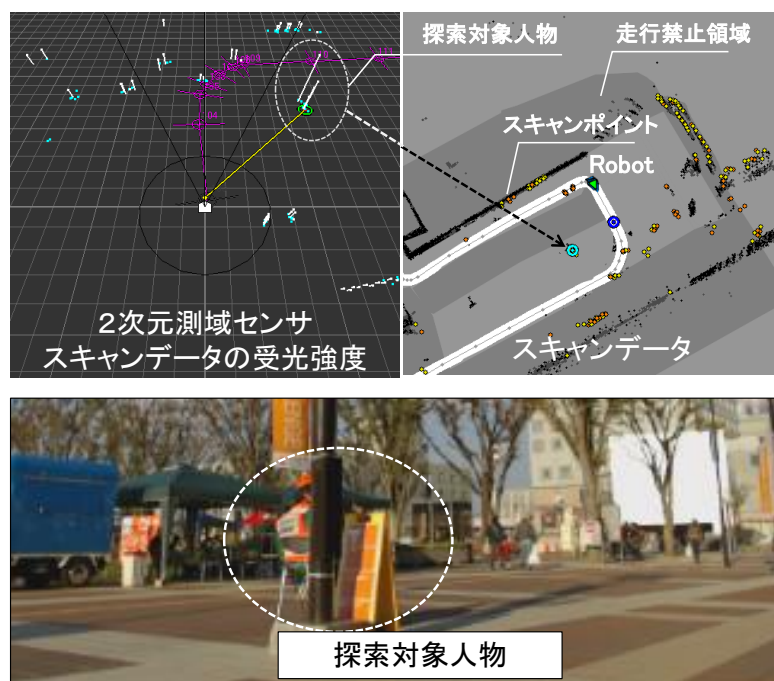


図 7.15 受光強度による探索対象人物の検知例

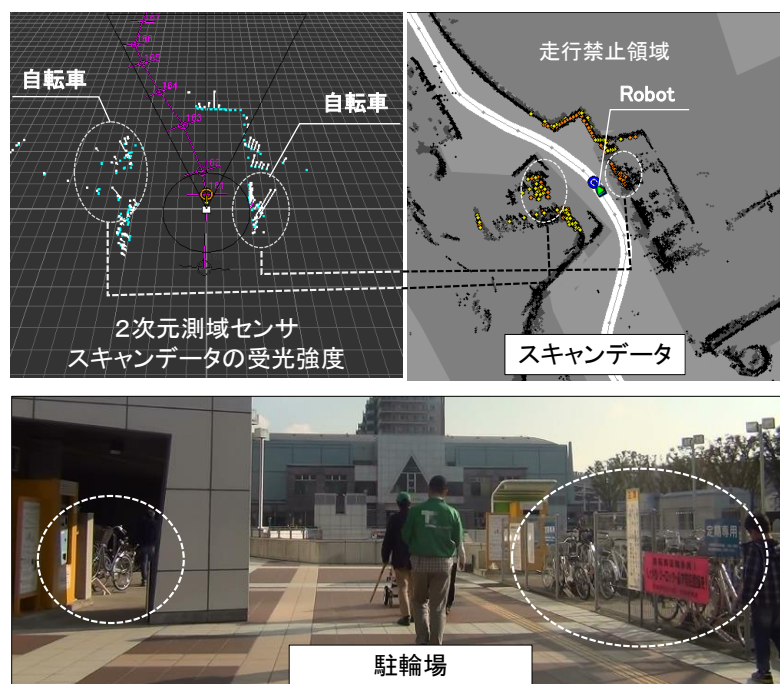


図 7.16 駐輪場付近の環境情報地図 (走行禁止領域)

## 7.4 まとめ

本章では環境情報地図の構成について述べた．本研究では環境情報地図を，ウェイポイント，低所特徴，走行不可能・禁止領域の情報を占有格子地図に重ねた階層構造をもつ地図と

して構成した。以下にその概要と有効性を示す。

### 1. ウェイポイント

環境に大きな変化が生じたときに、ロボットの経路を人手によって編集することで、経路を再設定することとした。これは占有格子地図の再利用性の向上に有効であった。

### 2. 低所特徴

これまでの占有格子地図と2次元測域センサのスキャンデータのマッチングによる自己位置・姿勢の推定に対して、3次元測域センサによって抽出した低所特徴のマッチングを追加した。2次元測域センサのみではランドマークが少ないことから自己位置・姿勢の推定精度が低下し、経路を逸脱する可能性があった。このような領域に対して、低所特徴とのマッチングによる自己位置・姿勢を加えたことで自己位置・姿勢の推定精度、および安定性が向上し、経路の逸脱を抑制することができた。

### 3. 走行不可能・禁止領域

本研究では、袋小路などのセンシングによる識別が困難な走行不可能領域を人手によって環境情報地図に付加する手法を構築した。本手法では、街路樹など事前に指定した走行不可能領域周辺のランドマークを2次元測域センサでセンシングしたとき、擬似的なスキャンポイントを発生させることで走行不可能領域を表現した。ロボットはそれらを回避することで、走行不可能領域を回避することができることを確認した。また、探索対象へのアプローチにおいては、市民との親和性から往来の真中や店舗の入り口など探索対象が明らかに存在しない領域を走行禁止領域として設定し、対象人物の誤検知によってロボットが経路を逸脱することを抑制する手法を構築した。これらの有効性をつくばチャレンジの実験走行で確認した。

以上の環境情報を提供する環境情報地図に対して、つくばチャレンジにおける一般市街地環境の自律走行によって有効性が確認できた。

## 第8章

# 一般市街地における自律実験走行の考察

### 8.1 はじめに

本研究で提示した自律移動ロボットの3要件, および環境情報地図による自律移動ロボットの実験走行を, 第2章で述べた自律移動ロボットの一般市街地における実証実験「つくばチャレンジ」で行った. つくばチャレンジでは, つくば市中心部に1[km]以上の課題コースが設定され, 参加者はその範囲でロボットの実験走行を行う. つくばチャレンジはロボットの自律走行に対して重要な知見を得られる貴重な場であり, 国内でこれほどの広範囲で50台におよぶ数の自律移動ロボットを走行させる実証実験を行った例はない. 著者はつくばチャレンジでロボットを自律走行させることで, 実環境における自律移動ロボット技術の課題を抽出することを参加の目的の一つとしている. それらを解決していくことで, より汎用的で多くの場所で動作する自律移動ロボット技術を構築することを目指す. 著者は2008年よりつくばチャレンジに参加している. つくばチャレンジの課題コースは毎年変更され, 難易度が上がっている. 本研究では課題コースと課題タスクが共通しているつくばチャレンジ2013から2015までを考察の対象とする. 特に実験走行で見られたロボットと市民との関わり, および他のロボットとの相互作用的な関係について述べる. その上で, 本研究で構築した自律移動ロボット技術の有効性について考察する.

### 8.2 つくばチャレンジの記録

本研究において, 著者が行ったつくばチャレンジ2013から2015までの実験走行の記録を表8.1に示す. 実験走行を通じた技術構築の成果発表会である「本走行」を含めて, 本研究のロボットの公式記録はこの表に示された全19回の自律走行である. ここで, つくばチャレンジの用語の定義について説明する. 「完走」はロボットがスタート地点から発進し, つくばチャレンジのルール内で自律走行によってゴールに到達したことを指す. また「課題達成」は, 「完走」に加えて探索領域内で指定された人数の探索対象人物を検知し, アプローチできたことを意味する.



## 8.2 つくばチャレンジの記録

記録 走行	日付	天候	状況	走行距離 [m]	走行時間 [min]	発見した 探索対象	結果
2013- 6th	10/27	晴れ	子供、自転車が前方直近にきた・いたため、オペレーターが一時停止。 走行終了理由：植木の縁石を乗り越し中に突入。 その後、自律的にバックして再開したが走行継続できず。 探索対象1：見落とし。 探索対象2：完全に発見し、認識。その前に花を誤検知。 探索対象3：見落とし。インフォメーションセンター前の看板を誤検知。	750	19	2/5	リタイア
2013- 7th	11/11	雨	雨のため、28分遅らせて出走。 橋の入り口：動作不安定。橋のポールに衝突。 探索3の直後、1326-01と遭遇。双方とも非常停止が、遅れて衝突。非常停止後、再開。（回避行動をとったが、走行回避したため？）橋の後、1302と遭遇、一旦停止。 パークビル前、AISTグループの帰路とすれ違い、人は避けてくれるので安心。探索4の手前：作業中の成蹊大のロボットの反射を対象として認識。 探索5：見落としとして5m前を通過。	1520	39	4/5	完走
2013- 8th	11/15	曇り	走行はスムーズ。雨の影響で苦労している様子だった。	1050	30	2/5	リタイア
2013- 9th	11/16	晴れ	学園線を渡る手前で、30km/hくらいで自転車が走ってきた（相手は避ける気はなかったように見える）。 ・第3エリアで狭い通路に横に広がって調整しているチームがあり、声を掛けて避けてもらった。 ・対象5発見時に、実験中のロボットとぶつかりそうになり、相手が停止。 対象1：自転車を誤検出。2回目検出。 対象2：警備の人の服と似ている。	1582	42	4/5	完走
2013- Final	11/17	晴れ	対象1：ちょっと遠い？(2m位)発見は音声でアナウンス。 13:45 停止。リスタート。（杖をついてる人を待つ。） 13:46 縁石にぶつかる。 13:48 リタイア。	792	21	3/5	リタイア
2014- 4th	10/12	曇り	坂道で一旦停止したところ10m弱転がり落ちる。 その後復帰。ゴール後停車せず、テントまで戻って停止	1500	37	1/5	完走
2014- 5th	10/13	雨	システムトラブルによりリタイア	940	23	2/5	リタイア
2014- 6th	11/3	晴れ	-	1645	70	1/5	完走
2014- 7th	11/10	晴れ	筆者コメント： つくばセンターでクリスマスドラマの撮影。 街路樹に巻きつけてあったイルミネーションを探索対象と判別し、街路樹の縁石に乗り上げてリタイア。	1129	34	1/5	リタイア
2014- 8th	11/14	晴れ	-	1750	48	2/5	完走
2014- 9th	11/15	晴れ	-	1753	50	2/5	完走
2014- Final	11/16	晴れ	-	1753	43	4/5	完走
2015- 2nd	9/26	曇り	筆者コメント： 三次元測域センサが停止したことで走行が不安定になり、ゴール2m手前でリタイア	1578	48	3/4	リタイア
2015- 3rd	10/16	曇り	SARAと衝突するも復活し、走行継続。 MAUVIに追いつき、追従走行を実施。	1580	46	3/4	完走
2015- 4th	10/17	曇り	横断歩道で、リスタートに失敗。	1400	43	2/4	リタイア
2015- 5th	11/3	晴れ	ターンした際に、随走委員を「見つけた」、他にも通行人を「見つけた」。オペレータの解説「アージの反射強度だろう」	1580	50	2/4	完走
2015- 6th	11/6	晴れ	探索対象の誤検出8回。車に当たりそうになり非常停止。 筆者コメント：コースを塞ぐように車両が停車された。 バックライトの反射板を探索対象と誤検知し、車両に接近した	870	34	4/4	リタイア
2015- 7th	11/7	晴れ	横断歩道で、リスタートに失敗。	1400	68	3/4	リタイア
2015- Final	11/8	雨	筆者コメント：雨の中、通常通りの走行が出来た。	1580	61	1/4	完走

表 8.1 つくばチャレンジ 2013 から 2015 における記録走行

つくばチャレンジ	自己位置・姿勢の推定	走行可能領域の識別	走行可能領域から 逸脱しない走行制御	1000m到達率 (到達回数/実験回数)
2013	あり	2次元測域センサ	なし	60.0% (3/5)
2014	あり	2次元測域センサ 環境情報地図	あり	78.8% (7/9)
2015	あり	2次元測域センサ 3次元測域センサ 環境情報地図	あり	83.3% (5/6)

表 8.2 つくばチャレンジ 2013 から 2015 における 1000[m] 以上の自律走行

### 8.2.1 記録の状況からの考察

#### 歩行者との関係

表 8.1 の状況欄に記載のとおり，つくばチャレンジ 2013 では，ルール上では完走でも安全のために歩行者が接近した際には安全確保のため，ロボットのオペレータである著者が頻繁にロボットを停止させていた．これに対してつくばチャレンジ 2014 と 2015 では，歩行者の接近に対して，安全管理上，著者は注意を払っていつでも停止するように待機していたが，実際に停止させた回数はつくばチャレンジ 2013 と比較して大幅に減った．これは歩行者に対するロボットの動きとして，ロボットが歩行者の手前で必ず減速して一時停止をしたことが有効であったと考えている．この制御を実装する前のつくばチャレンジ 2013 では，歩行者の手前で，ロボットが歩行者に対して回避行動を行った際に歩行者を驚かすことあった．ロボットの動きが急で，歩行者にとって予測が難しい動作であったためと著者は考えている．このようにして歩行者を驚かせた結果，歩行者の動きも急で複雑になったため，安全確保のためにロボットを停止させることが必要となった．この問題に対して，つくばチャレンジ 2014 以降はロボットが歩行者に対して減速して一時停止を行うようにした．これによって歩行者が余裕を持ってロボットの傍らを通り過ぎることができるようになった．

#### コースを塞がれた場合

表 8.1 に示す 2014-7th(2014 年 11 月 10 日) の記録では，図 8.1 に示すとおり，ロボットがクリスマスのドラマ撮影の業者によって街路樹に巻かれたイルミネーションを，2次元測域センサの受光強度から対象人物として誤検知した．そのため，街路樹を囲む縁石に乗り上げてリタイヤとなった．これをきっかけとして，著者は街路樹の周りにロボットを近づけさせないようにするため，環境情報地図に走行不可能領域の設定を加えた．また，表 8.1 に示す 2015-6th(2015 年 11 月 6 日) の記録では，ロボットは作業車両の回避を行っている最中に，作業用車両のテールライトの反射板を対象人物と識別し，接近しようとした．そのため，車



図 8.1 クリスマスのドラマ撮影現場と演出に用いられたイルミネーション

両に接触しそうになり、強制停止した。このような予期せぬコース変更を伴う環境の変化への対応がまだ十分ではないため、今後の課題としたい。

#### 自律走行の安定性

表 8.2 は、各つくばチャレンジにおける本研究のロボットの機能と 1000[m] 以上の自律走行の割合を示す。つくばチャレンジ 2013 と比較して 2014 は完走の割合が大幅に増えた。この理由を著者は次のように考えている。2013 年時点では、ロボットの自律走行の安定化を自己位置・姿勢の推定に依存していた。これに対して、つくばチャレンジ 2014 では、走行可能領域の識別、および走行可能領域から逸脱しない走行制御を実装した。つくばチャレンジ 2015 では 3 次元測域センサを導入し、低所特徴による走行可能領域の識別を実装したことから、さらに安定した自律走行が実現した。これらは著者が提示した自律移動ロボットの 3 要件に基づく技術であり、その有効性が確認できた。

### 8.3 実験走行の考察

著者のロボットは、本研究における技術構築によって実験走行を重ねるにつれて安定して走行するようになったが、未だ課題達成は実現できていない。しかしながら、それは探索対象の検知技術に負うところが大きい。ロボットが走行可能領域を識別して動的に経路を設定し、自律走行することが課題タスクとして設定された人物探索の本質であり、自律移動ロボット技術を評価する観点である。単にロボットが経路に沿ってスタートからゴールまで自律走行を行うことと、探索行動を実行した上でゴールに到達するのでは技術の複雑性が異なる。したがって、本研究では探索行動を実行して完走したことに対して、実験走行を考察する。

### 8.3.1 リタイアした事例

2013 年 11 月 17 日のつくばチャレンジ 2013 の本走行では、第 2 探索エリアを通過した地点で本来のコースより外側にずれて走行した。そのため、図 8.2 に示す縁石に接触してリタイアとなった。この縁石はコースから 80[cm] 程度離れており、コース上を走行したならば、接触することはなかった。著者はリタイアの原因を、ロボットの進路変更時における自己位置・姿勢の推定精度が低下したためと考えている。ロボットの進路変更時には、ロボットの姿勢が大きく変化し、それに伴って 2 次元測域センサの視野も大きく変化するため、それまで連続的に観測できていたランドマークが観測できなくなる。これによって、2 次元測域センサのスキャンデータと占有格子地図の誤マッチングが生じる可能性が高くなる。つくばチャレンジ 2013 の第 6 回、および第 8 回実験走行会においても地図との誤マッチングによって自己位置・姿勢の推定が破綻し、リタイアとなった。この問題の対策として、ロボットが 60[deg] 以上の進路変更点ではマッチングの評価とパーティクルのリサンプリングを行わないこととしていた。しかし、このことによって、つくばチャレンジ 2013 の本走行では図 8.3 に示すように進路変更点付近ではパーティクルが拡散し、自己位置・姿勢の推定精度が低下させた。その結果、ロボットがコースから 80[cm] 程度離れた地点を走行した。この程度の誤差ならば走行中に修正が可能であるが、図 8.2 に示すとおり、進路上に識別が困難な縁石があったため、回避できず車輪が引っ掛かってリタイアとなった。また、表 8.2 の 2013-6th の記録示すとおり、2013 年 10 月 27 日の第 6 回実験走行会の記録走行においてもほぼ同じ場所で縁石に接触し、リタイアとなった。

著者らは、このつくばチャレンジ 2013 の時点で縁石に接触してリタイアする問題は、自己位置・姿勢の推定誤差の他に縁石がセンシングできていないこともあると考えていた。10[cm] 以下の縁石はつくばセンター以外にも一般的に数多く見られ、ありふれた存在である。今後、さらにロボットが設定されたコースを離れて領域を探索しながら走行するためには、低い物体の検知を含めた走行可能領域を識別する手法を開発する必要がある。したがって本研究では、つくばチャレンジ 2014 では環境情報地図を用いた走行不可能領域の回避を実装した。さらにつくばチャレンジ 2015 では 3 次元測域センサによる低所特徴の識別を構築し、実装した。これらの技術構築によってロボットがつくばチャレンジ 2013 では識別できず回避出来なかった縁石を識別し、回避できるようになった。

### 8.3.2 完走した事例

つくばチャレンジ 2014 の本走行におけるロボットの走行軌跡および対象人物の検知結果について、第 1 探索エリアを図 8.4、第 2 および第 3 探索エリアを図 8.5 に示す。以下、環境情報地図における「走行禁止領域」と「走行不可能領域」の有効性について述べる。



図 8.2 つくばチャレンジ 2013 本走行において、リタイアしたときの様子

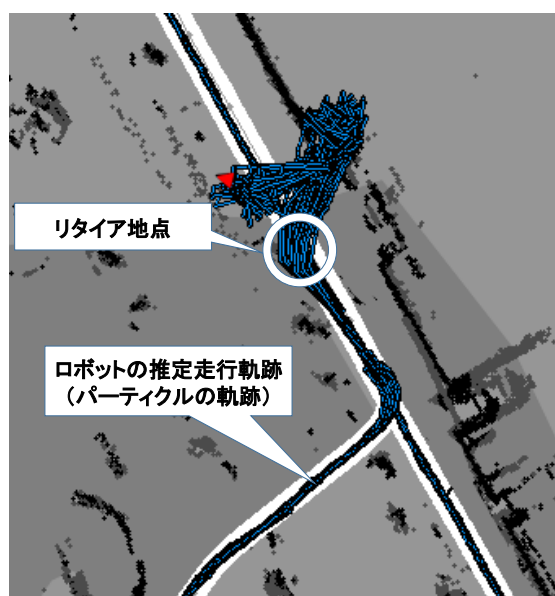


図 8.3 つくばチャレンジ 2013 本走行において、リタイアに至った走行軌跡

#### 走行禁止領域による探索対象人物の誤検知の低減

第1探索エリアでは、ロボットは誤検知なく対象人物にアプローチできた。これに対して第2および第3探索エリアでは多くの誤検知をした。先述のとおりロボットは、対象人物の探索を2次元測域センサの受光強度のみで行っている。そのため、環境中の建物や設置物の金属部位が誤検知の対象となりやすい。ロボットによる誤検知の頻度が高い物体の例として、建物外壁にあるガラス扉の枠や自動販売機などがある。また、自転車の反射板も検知頻度が高く、自転車が停止している場合は、ほぼ確実に誤検知する。一方、自転車が動いている場合はロボットがアプローチする前にキャンセルされる。したがって、本研究では誤検知しやすい自転車や設置物が集中している建物の外周、露店、駐輪場、および歩道の中央領域を走



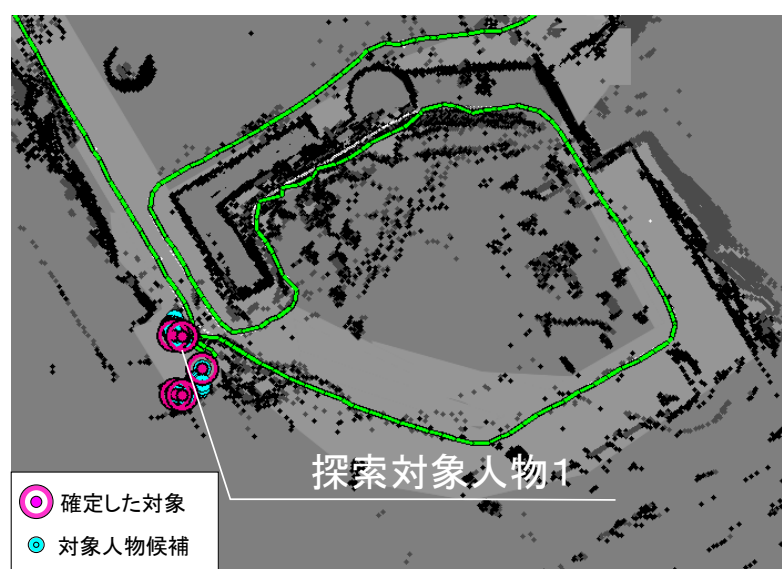


図 8.4 つくばチャレンジ 2014 第 1 探索エリア

行禁止領域に設定し、ロボットが対象人物の探索を行わないようにした。

#### 走行不可能領域による回避動作

図 8.5 に示す第 3 探索エリアでは、つくばチャレンジ 2014 の全実験走行会を通じて街路樹の近傍に対象人物がいることが多かった。街路樹周辺には 2 次元測域センサでは識別が難しい縁石がある (図 8.6)。これらを回避するため、著者が環境情報地図において街路樹周辺を走行不可能領域に指定した。すなわち第 7 章で述べたとおり、ロボットが「走行不可能領域」に指定した街路樹に接近した場合には「擬似スキャンポイント」が生成される。これに対してロボットが回避動作をとることで縁石を回避することができる。しかし実験走行では、探索対象人物の誤検知によって、次の不安定な動作が発生した。

つくばチャレンジ 2014 の本走行当日、図 8.5 に示す位置、すなわち課題コースに対して街路樹の向こう側に移動販売車が営業を行っていた。車両のホイールは金属であり、2 次元測域センサの受光強度が高く、ロボットは高確率で対象人物と誤検知する。この日もロボットはこの移動販売車のホイールを誤検知して、これに対してアプローチを行った。しかし、ロボットは走行不可能領域に指定されていた街路樹周囲に生成された「擬似スキャンポイント」のため、縁石より先には進めず、数回縁石に車輪の接触が発生したが、しばらくその場で接近と後退を繰り返す膠着状態に陥った。その様子を図 8.7 に示す。最終的にはアプローチの時間制限機能によってアプローチ対象がキャンセルされ、元のコースに復帰した。以上より、走行不可能領域とアプローチの時間制限によってリタイアを回避できたといえる。その後は順調に自律走行を継続し、ゴールに到達した (図 8.8)。

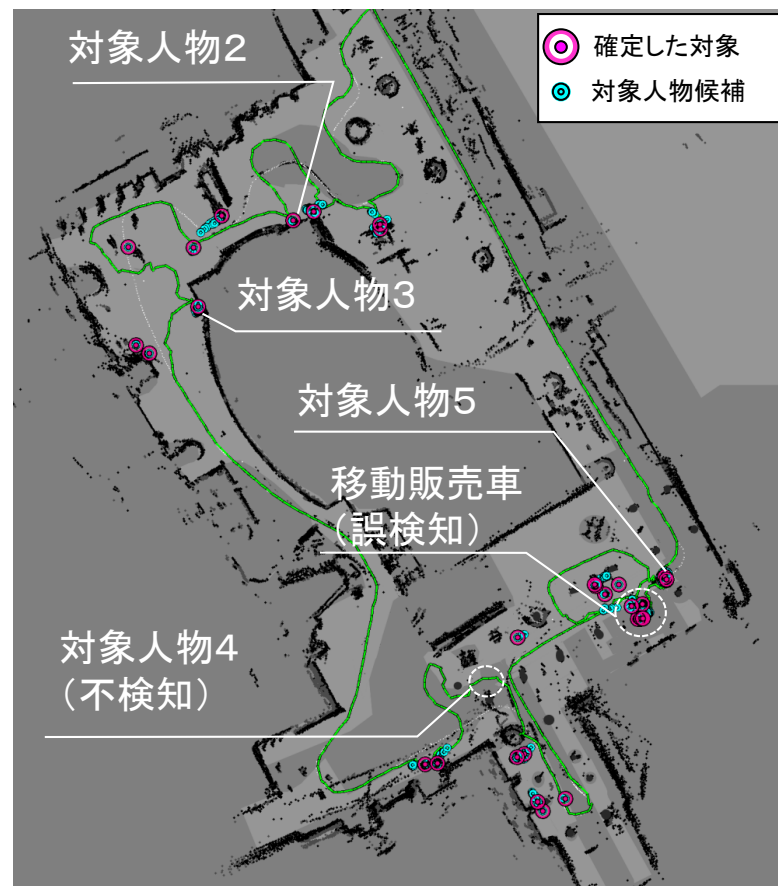


図 8.5 つくばチャレンジ 2014 第 2, 第 3 探索エリア



図 8.6 街路樹の縁石

## 8.4 自己位置・姿勢の推定の考察

著者が Monte Carlo Localisation に基づいて構築した占有格子地図と 2 次元測域センサのスキャンデータのマッチングによる自己位置・姿勢の推定手法は、基本的にコースの大部分で安定していた。しかし、特定のランドマーク周辺で、高い再現性をもった誤マッチングに



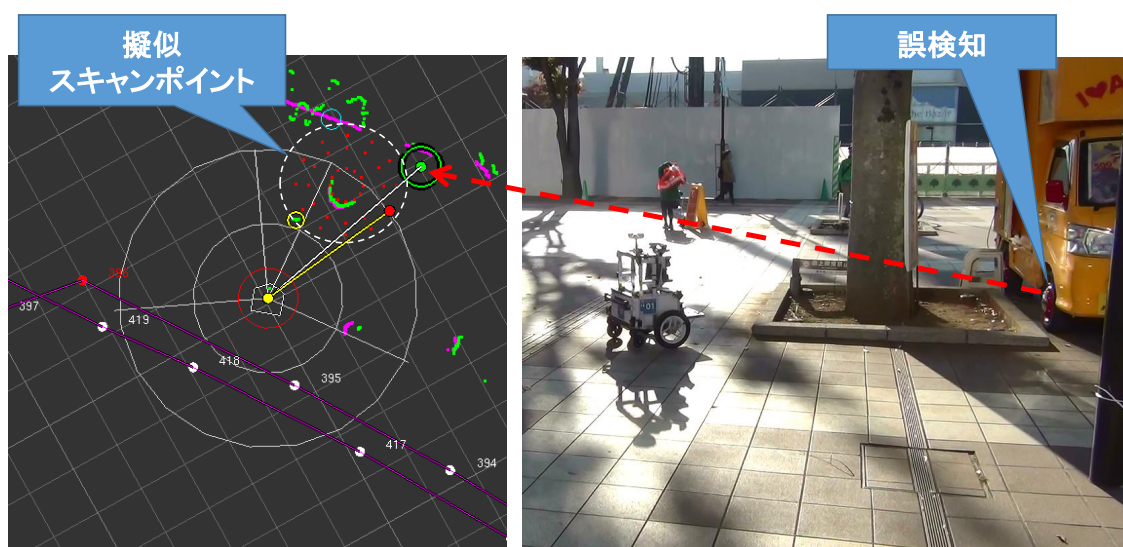


図 8.7 第3探索エリアにおける誤検知



図 8.8 つくばチャレンジ2014で完走を達成したときの様子

よって破綻することがあった。その例として、2013以降のコースに含まれる大清水公園内に円形の花壇がある。これはコースの複数箇所から測域センサで観測しても、形状が円形であることから姿勢の推定が正確にできない。そして周囲はランドマークに乏しいため、姿勢の推定精度が低下し、誤差が蓄積する。この状態でこの区間を通り抜けた場合、その後に誤マッチングが起こりやすく、自己位置・姿勢の破綻につながる。対策として、第7章で述べたとおり、本研究では低所特徴である芝生と歩道の境界を用いた自己位置・姿勢の推定手法を構築した。その結果、つくばチャレンジ2015において3次元測域センサによって低所特



図 8.9 円形の花壇

徴が抽出できたことで、この領域で自己位置・姿勢の安定性が向上した。一般市街地においても歩道の境界が縁石などの低所特徴であることが多いため、本研究で構築した手法は有用と考える。

## 8.5 他のロボットとの関係の考察

### 8.5.1 成功例：対向接近してきたロボットの回避

つくばチャレンジ 2014 の本走行会で、本研究のロボット（以下、本ロボット）と、対向接近してきた大川らのチーム [79] のロボット（以下、対向ロボット）の間に生じた相互の回避動作の場面を図 8.11 に示す。本ロボットは（図 8.11 (1)）に示すとおり、回避対象の検知範囲である前方 3[m] の範囲で対向ロボットを検知し、減速して相手との距離が 1.5[m] 以内の位置で停止した。このとき、対向ロボットも同様に停止した（図 8.11 (2)）。本研究で設定した回避対象に対する動静の観測時間 (3[sec]) の経過後、本ロボットは回避のための走行目標点を設定し、その場での回転より回避動作を開始した（図 8.11 (3)）。一方で相手のロボットも回避行動を開始した。この直後に相手のロボットとの距離が 0.6[m] 以下となったため、本ロボットは急減速し（図 8.11 (4)）、再度停止した（図 8.11 (5)）。この間、対向ロボットは本ロボットに対する回避動作を継続した。その後、対向ロボットが通過したため、本ロボットは通常の走行を再開した（図 8.11 (6)）。対向走行によって接近してきたロボットを回避する動作は、相手の動きにも依存する協調動作である。著者の経験から、両方のロボットが互いの相手の前で減速し、一時停止する機能を有している場合は、回避の成功率が比較的高かった。一方で対向ロボットによっては回避のタイミングに余裕がないことも多かった。より早期に、確実な回避を実現するには相手が移動物か静止物かを識別し、その動きを予測することが必要となる。

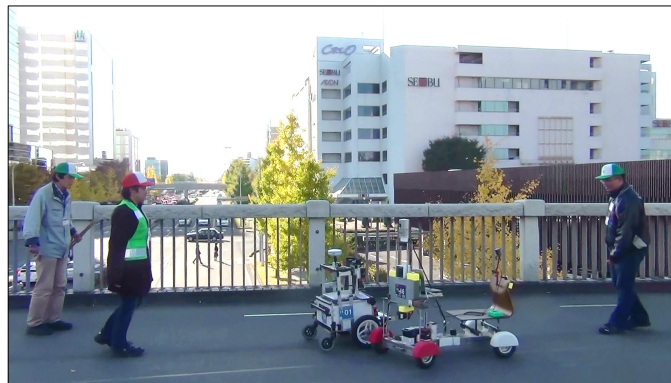


図 8.10 対向接近してきたロボット

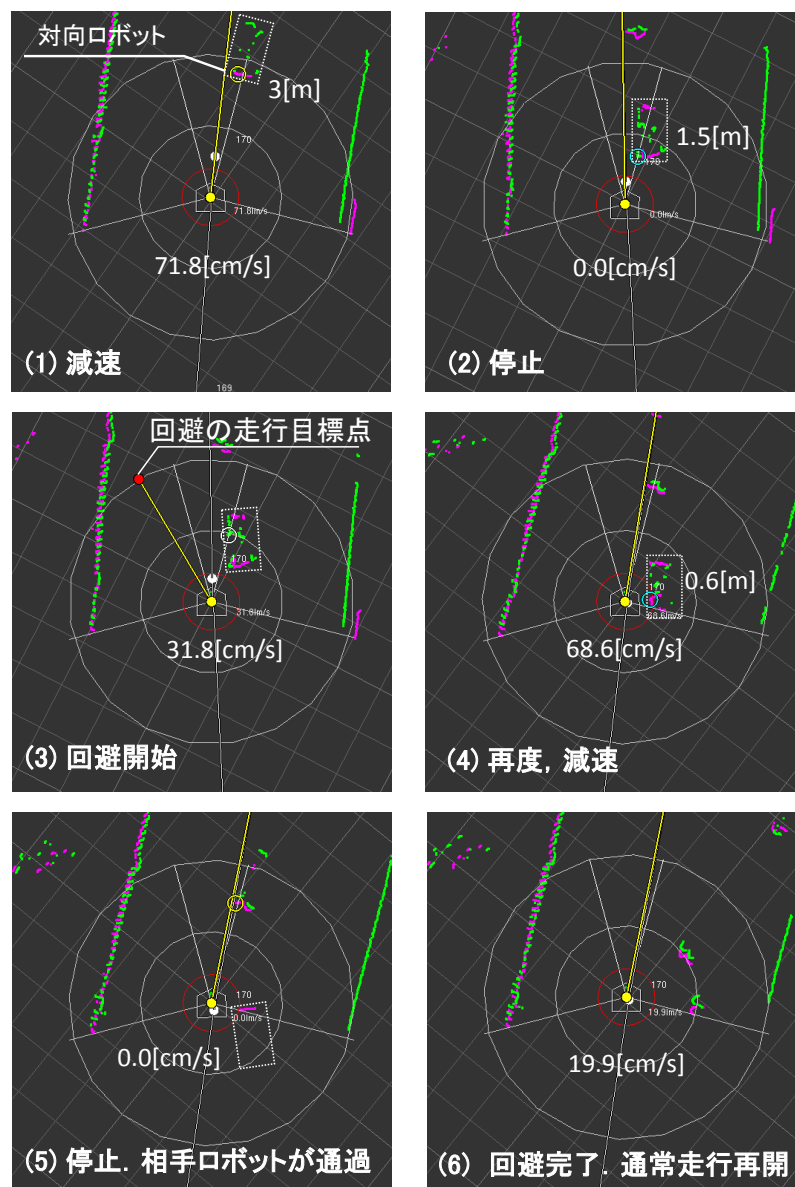


図 8.11 対向接近してきたロボットに対する回避動作



## 8.5.2 失敗例：側面から接近してきたロボットに対する回避

本研究のロボットでは、歩行者や他のロボットが側面から接近する場合の回避動作は、未だ解決できていない問題である。その例として、つくばチャレンジ 2015 において、対象人物の探索行動中に他のロボットが右から接近してきた状況を図 8.12 に示す。本研究では側面から接近する対象の回避は定義していない。そのため、本ロボットは通常の側方にある物体と同様の回避行動を行ったが、避けきれなかった(図 8.12 (2)(3))。相手のロボットも減速したが間に合わず、本ロボットの側面に接触した。互いのロボットは、それぞれ接触を検知した直後に一時停止し、その後、後退した(図 8.12 (4)(5))。その後は、互いのロボットの回避動作によって、それぞれ元の経路に復帰し、自律走行を再開した(図 8.12 (6))。なお、本ロボットは自律走行を継続し、ゴールに到達した。側面から接近する対象を識別するためには、相手の軌跡の推定と回避のための動作を決定する二つの技術課題がある。すなわち、動的な走行可能領域の識別が必要である。

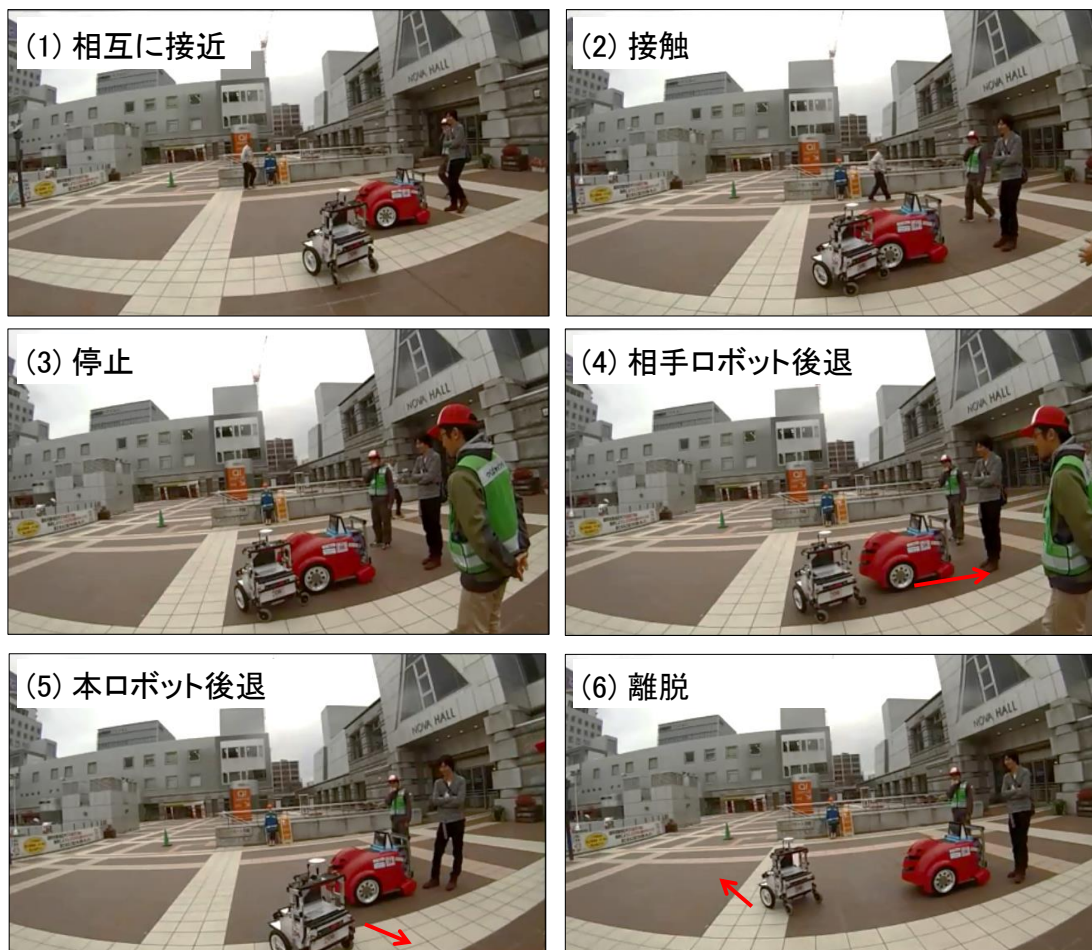


図 8.12 側面から接近してきたロボットに対する回避動作



図 8.13 横断歩道手前の停止時の問題



図 8.14 横断歩道手前のロボットによる行列

### 8.5.3 横断歩道前の行列動作

つくばチャレンジ 2015 において、初めて横断歩道の通過が課題コースに含まれた。今回は安全上の観点から、つくばチャレンジの実行委員より、ロボットは横断歩道の手前で一時停止し、その場にいる係員が横断歩道周辺に車両がないことを確認することで安全を確保するルールが定められた。安全が確認できたことが係員より指示された後、オペレータがロボットの停止を解除することで自律走行を再開する。また、横断歩道手前でロボットで混み合う状況を想定し、ロボットは横断歩道の手前 10[m] ほどの課題コース上に設定された区間

で、行列を形成して順番を待つことが求められた。

#### 後続する対象を誤った例

一般的に行列を形成することはロボットにとって簡単ではない。まず、正確にコース上を走行することが必要である。次に、行列に加わった後、前方にいるロボットは回避しないが、例えば歩道に設置してある車両進入止めのポールは回避しなければならない。すなわち、前にいるロボットとそれ以外を識別する必要がある。その上で、前との距離を短く詰めなくてはならない。つくばチャレンジ 2015 の実験走行が開始された当初、著者は行列動作は追従走行の応用で実現できると考えた。そのため、前のロボットが停止しているときにはそのまま待機して、追い越さないようにした。しかし、2015 年 10 月 17 日の第 4 回実験走行会において図 8.13 に示すとおり、ロボットが経路から若干ずれると、車両の進入止めのポールに対して行列動作を実行し、そのまま停留し続け、動けなくなる問題が発生した。

#### 行列を維持できなかった例

ロボットが行列に加わることができたが、途中で逸脱した例を以下に示す。先に述べた車両止めのポールに対してロボットが停留する問題を回避するため、環境地図によって車両止めのポール前では直前の対象を回避する動作を設定した。しかし実際には次の事象が発生した。2015 年第 7 回の実験走行では図 8.14 に示すように横断歩道前にロボットの行列ができた。本ロボットはこの行列に加わることができた。しかし、先に述べたとおり、横断歩道手前において、行列で並んできた直前のロボットを回避する動作をとった。これによって本ロボットは行列を逸脱したため、危険であることから著者の判断で自律走行を終了させた。一方、他に並んでいるロボットがいなかったときには正確な位置で一時停止し、横断歩道を通過できた。走行自体は通常の自律走行と同等であり、変化はない。行列を正確に行うには、前のロボットや歩行者を識別する必要がある。

## 8.6 雨天での走行の考察

つくばチャレンジ 2015 の本走行 (2015 年 11 月 8 日) は、これまでのつくばチャレンジの本走行で初めて雨天の中で開催された。当日、本ロボットに簡易的な防水対策を施し、出走させた。他のロボットはリタイヤが続出したため、本ロボット前後には他のロボットがほぼ存在せず、大清水公園以降は独走状態であった。ロボットが外界センシングによって雨粒を前方の回避対象として捉え、頻繁に一時停止を繰り返した。対象人物の探索行動では、雨によって対象人物を検知してもアプローチの途中で一時的に識別できなくなったため、アプローチを中断することが多かった。そのため、対象人物は 4 人中 1 人のみのアプローチ成功であった。一方でロボットの自己位置・姿勢の推定と走行制御には大きな問題はなく、通常

通りの自律走行ができた。その結果としてゴールに到達し、課題コースを完走した。その様子を図 8.16 に示す。雨粒は外界センシングにおいてランダムなノイズとしてみるができる。本研究のロボットシステムは特に雨を意識した構築は行っていなかったが、結果として雨から大きな影響を受けることはなかった。このことを次のように分析する。

本ロボットにおいて、2次元および3次元測域センサのスキャンデータのマッチングによる自己位置・姿勢の推定では、雨のようなランダムノイズよりも、建物の外壁などのランドマークを観測したスキャンデータの方がマッチングに対する寄与が大きい。そのため、雨に対して頑強であるといえる。走行制御においては、経路上の対象に対して一時停止してから動静を判別する本手法が有効に機能したと考えている。本ロボットは雨粒に対して一時停止を繰り返したが、他のロボットで見られたような雨粒を回避して経路を逸脱することはなかった。このことは自己位置・姿勢の推定にも良い効果をもたらした。なぜなら、一般的に回避行動のふらつきは誤マッチングが発生する可能性を高める。したがって、経路からの逸脱を抑制する本手法は、雨天においても安定した自己位置・姿勢を行うことに有効性が示せたと考えている。以上より、雨のような突発的なノイズに耐性を持つ自律移動ロボット技術が構築できた。





1. Start



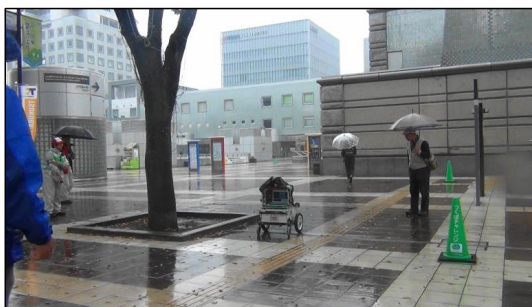
2. 公園遊歩道



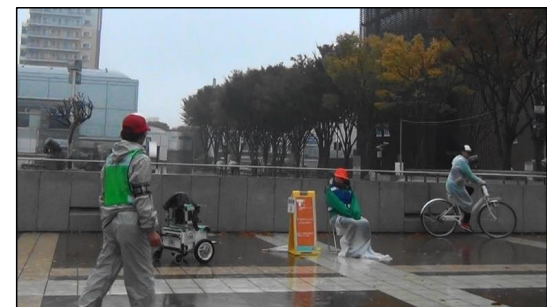
3. 前方のロボットに追従走行



4. 一般遊歩道



5. つくばセンター



6. 対象人物を検知してアプローチ



7. 横断歩道前で一時停止



8. 横断歩道を渡る

図 8.15 雨天で行われたつくばチャレンジ 2015 の様子



図 8.16 つくばチャレンジ 2015 で完走を達成したときの様子

## 8.7 まとめ

本章では、つくばチャレンジ 2013 から 2015 までの実験走行より、本研究で構築した自律移動ロボット技術の有効性と課題について考察した。走行可能領域の識別においては、リタイアした事例と完走した事例を比較した。実験走行から、特に縁石や段差などの低所特徴の識別が重要であることを示した。このため、ロボットが走行できない領域(走行不可能領域)を環境情報地図で指示することによって、センサで識別できない段差に対しても回避が可能であることを示した。

他のロボットとの関係では、正面から接近するロボットに対する回避動作が、比較的安定して実行できることを示した。その一方で、側面から接近するロボットに対しては、回避することが難しいことがわかった。これには、著者は相手の動きを予測して、動的に走行可能領域を抽出することが必要であると考えている。

横断歩道手前で、他のロボットにより形成されている待ち行列に加わる動作について、本研究ではロボットが行列のライン上を走行するように走行経路を正確に設定した。しかし、それでも前のロボットの識別に失敗し、回避動作を行ったことがあった。また、行列の途中から割り込んだこともあった。行列動作を確実に実行するには、後ろに並ぶ対象であるロボット、または行列のライン上で動きのある物体を識別する必要があると考えている。

自己位置・姿勢の推定については、公園の円形花壇などランドマークの形状によっては地図とのマッチングが正確にできず、姿勢の推定精度が低下して自己位置・姿勢の推定が破綻する可能性があった。これに対して本研究では歩道と芝生の境界を抽出し、マッチングに用いることで姿勢の推定精度を維持できることを示した。

雨天時の走行については、特に問題となる事象は発生しないことが確認できた。雨天では雨粒が外界センシングにとってランダムなノイズとなり、ロボットの回避行動を誘発し、走行可能領域の逸脱や、自己位置・姿勢の推定を破綻させる原因となる。このため、つくばチャレンジ 2015 では多くのロボットがリタイアとなった。これに対して本研究では走行可能領域から逸脱しない走行制御手法のため、直前で検知した雨粒に対して一時停止を繰り返したが、回避行動をとることはなく、走行経路からの逸脱はほぼなかった。その結果、ゴールに到達し、課題コースを完走した。以上より、突発的なノイズに対して安定した自律走行が持続できる自律移動ロボット技術を構築することができたと考えている。

本研究における自律移動ロボット技術の構築において、達成できたこと、および課題を以下に示す。

#### 達成できたこと

1. 一般市街地の走行
2. 公園内遊歩道の走行
3. 歩行者の相互作用的な回避
4. 歩行者・他のロボットの追従走行

#### 課題

1. 検知対象の速度、および移動方向の推定による動的な走行可能領域の識別  
検知対象の動静の判別、および走行可能領域の変化を予測すること。
2. 動的な走行可能領域の識別に基づく走行制御  
正面、および側方から接近する歩行者や他のロボットに対する回避動作を定義し、早期に回避すること。
3. 安定した行列動作

著者は、これまでのつくばチャレンジの実験走行の結果により、一般市街地におけるロボットの、基本的な自律走行が実現できたと考えている。今後の課題は、正面および側方から接近するロボットや歩行者に対する早期の回避行動であり、そのために検知対象の動きの予測による動的な走行可能領域の識別手法の構築が必要と考えている。

## 第9章

### 結 言

#### 9.1 本論文のまとめ

本論文では、一般市街地における自律移動ロボットの走行に関する研究について述べた。安定した自律移動ロボットを実現するための3要件を提示してそれぞれの要素技術を構築し、それらを環境情報地図によって統合した。また、一般市街地における実証実験「つくばチャレンジ」に参加し、実験走行で経験した多様な事象に対する考察、および得られた知見と課題について述べた。以下に本論文の各章の概要を示す。

##### 第1章

本研究の背景として自律移動ロボットと自動運転車を比較し、一般市街地を走行する自律移動ロボットを実現するための課題を述べた。これらに対して、自律移動ロボットに関するこれまで研究について説明し、本研究の動機と目的およびアプローチについて述べた。

##### 第2章

本研究における実環境における自律移動ロボットの開発手法について述べた。自律移動ロボットの開発は、一般的な工学分野でとられる事象のモデル化による手法と比較して、対象とする実環境のモデル化が困難である。したがって、本研究において著者は具体的なタスクを設定して実環境の中で実験を繰り返しながら、そこから抽出される課題を解決する技術構築を行うタスクオリエンテッドアプローチによって自律移動ロボットを開発することとした。そして、その評価はタスクの達成度によることを述べた。このような自律移動ロボットの実験走行の場として、一般市街地における実証実験「つくばチャレンジ」の概要と意義、参加チームの種別およびロボットに求められる条件について述べた。つくばチャレンジの課題コースはロボットのために手を加えない、あるがままの環境としている。2007年から始まったつくばチャレンジで、これまでに環境実環境の縮図とも言えるほど多くの環境、多様な条件で実験が行われてきた。したがって、つくばチャレンジで安定して自律走行できるロボットは、他の市街地でも高い安定性で自律走行できることを課題コースとの比較によって示した。

本研究における自律移動ロボットの開発にあたって、これまでの研究と著者の研究を分析し、自律移動ロボットの要件を提示した。本研究における自律移動ロボット技術は、基本的に、事前に設定された経路をロボットが追従走行するアプローチをとる。ロ



ボットの走行経路は、設定された時点では走行可能領域である。しかしながら、実環境では経路上に物体が置かれることや、歩行者や自転車が走行している場合がある。それらを回避するには走行可能領域の識別手法と、そこから逸脱しない走行制御手法が必要となる。本研究において、実環境における実験走行から設定した自律移動ロボットの3要件を以下に示す。

1. 外乱に強く、高精度で再現性の高い自己位置・姿勢推定
2. 走行可能領域の識別
3. 走行可能領域から逸脱しない走行制御

本研究では、この3要件に対して要素技術を構築し、環境情報地図によって連携させることで、一般市街地環境で安定して自律走行するロボットを実現することを目指した。

### 第3章

自律移動ロボットの車両構成、およびシステム構成と各機能について述べた。ロボットの車体は左右に独立した動輪を有する独立二輪操舵方式とし、段差の踏破性を重視して動輪を前方に配置した。また車輪は比較的大きな12[inch]のホイールとクッション性と接地性から空気タイヤを用いた。

ロボットの外界センシングには2次元測域センサ2個、および3次元測域センサ1個を用いる構成とした。2次元測域センサは地図とのマッチング、および進路上の回避対象の識別に用いることから下方に設置することが有利であるため、走行に支障のないことを考慮してビーム面が地面からの高さ20[cm]となる位置に1個設置した。もう1個はつくばチャレンジの人物探索に用いるため、ビーム面の高さが地面から55[cm]の位置に設置した。3次元測域センサは、路面の段差などの低所特徴の抽出に用いた。

自律移動ロボットのシステムは、各機能を独立した機能プロセスと上位の行動決定プロセス、および自己位置・姿勢の推定プロセスより構成した。各プロセスは共有メモリを介して互いのデータを参照する。このシステム構成は、新たな機能に対応するソフトウェアの追加が容易であるため、システムの拡張性に利点があることを述べた。

### 第4章

一般市街地環境における高精度な自己位置・姿勢の推定手法について述べた。最初に、自律走行の基準となる自己位置・姿勢の推定には、精度と再現性において測域センサのスキャンデータと占有格子地図とのマッチングによる手法が有効であることを述べ、これに用いる占有格子地図の作成手法について説明した。占有格子地図の作成手法はFastSLAMの枠組みを用いた。ロボットのジャイロオドメトリにより取得した走行軌跡に沿って2次元測域センサのスキャンデータをプロットすることで占有格子地図を作成した。本研究ではジャイロオドメトリの累積誤差をDGPS測位点によって補正

することとした。そのため、マルチパスなどの影響が少なく比較的精度の高い測位点 (DGPS 高精度測位点) を、以下の手法によって抽出した。

1. DGPS 測位のサンプリング時間におけるロボットの移動距離と測位点の間隔の比較
2. ロボットが直線走行したときの DGPS 測位点列に対する、主成分分析を用いた直線性の評価

本研究では DGPS 高精度測位点による評価をパーティクルフィルタによる FastSLAM の枠組みに取り入れ、形状が正確で経路とランドマークに矛盾のない占有格子地図の作成手法を構築した。占有格子地図とのマッチングによる自己位置・姿勢の推定においては、パーティクルフィルタによる Monte Carlo Localization を用いることとした。その有効性を検証するため、宇都宮大学工学部キャンパスに設定した走行距離 1200[m] のコースで実験走行を行った。自己位置・姿勢推定の安定性の評価として、2次元測域センサのスキャンポイントにおいて占有格子地図にマッチングしない割合を表す「非マッチング率」によって評価した。その結果、実験走行ではランドマークが少なくマッチングが十分にできない場所においてもロボットは自律走行することができたが、マッチング率が低下した区間で2次元測域センサに外乱が入力された場合、自己位置・姿勢の推定が破綻する可能性があることがわかった。これについては、次章で述べる走行可能領域の識別と組み合わせることで、より安定した自己位置・姿勢の推定の実現を目指すこととした。

## 第5章

走行可能領域の識別に対して、その高さによって非接触センサ、および接触センサによって低所特徴を抽出する手法を構築した。非接触センサでは、実環境では路面の凹凸などによってロボットの姿勢が変化するため、単純な高さの計測では低い段差などの低所特徴と地面の区別が難しい。そのため、著者は低所特徴の識別において水平距離のちがいに着目した。これによって3次元測域センサで地面をセンシングしたときの Spot（レーザビームによる測距点）の水平距離をテーブル化し、それとの比較によって低所特徴を抽出する手法を構築した。その結果、目標とした高さ 5[cm] 以上の低所特徴を抽出することができた。一方で、非接触センサでは、落ち葉などとの区別が困難な地面との高低差が小さい低所特徴を、接触センサ、すなわち本研究では接触したときの駆動輪の電流値変化から抽出する手法を構築した。

以上より第5章では、本研究で構築した非接触センサ、および接触センサによる低所特徴の抽出手法によって、ロボットの自己位置・姿勢の推定が破綻しない限り、ロボットが低所特徴を回避できることを示した。また、接触センサによる識別を応用した例として、つくばチャレンジ 2011 において両側に低い縁石のある狭いスロープを走行

した例を示した。

## 第6章

実環境において、ロボットが走行可能領域からの逸脱を抑制し、自律走行を持続するための走行制御手法の構築について述べた。本研究においてはロボットは事前に与えられた走行経路からの逸脱を抑制することでロボットのリタイアのリスクを低減することとした。よって本研究では、ロボットの走行可能領域からの逸脱を抑制するため、走行経路上にいる歩行者や他のロボットに対して追従することとし、それらに対する到達時間“Time To Contact”(TTC)を一定にする速度制御を構築した。一方、経路外の対象に対しては走行可能領域内に走行目標点を設定することで回避することとした。また、一般環境におけるロボットに求められる動作として「行列」がある。例としてつくばチャレンジ2015では横断歩道を渡る直前で安全確認のため、ロボットが行列に加わって並んで待つことが求められた。そのため、本研究ではTTC制御を応用して行列動作を構成した。しかし、横断歩道手前の車両進入止めのポールを誤識別してその後ろに並んだ場合、行列動作が破綻する問題が明らかになった。これについては、センシングした対象の種別を識別する技術が必要であるため、今後の課題とした。以上の技術構築によって、著者はロボットが走行可能領域から逸脱することを抑制し、安定した自律走行が継続できることを示した。

## 第7章

本章では環境情報地図の構成について述べた。環境情報地図は、経路、低所特徴、走行不可能・禁止領域の情報を占有格子地図に重ねた階層構造をもつ地図として構成した。

### 1. ウェイポイント

環境に大きな変化が生じたときに、ロボットの経路を人手によって編集することで、経路を再設定することとした。これは地図の再利用性の向上に有効であった。

### 2. 低所特徴

これまでの占有格子地図と測域センサのスキャンデータのマッチングによる自己位置・姿勢の推定に対して、3次元測域センサによって識別した低所特徴のマッチングを追加した。2次元測域センサのみではランドマークが少ないことから自己位置・姿勢の推定精度が低下し、経路を逸脱する可能性があった。このような領域に対して、低所特徴とのマッチングによる自己位置・姿勢を加えたことで自己位置・姿勢の推定精度が向上し、経路の逸脱を抑制できた。

### 3. 走行不可能・禁止領域

袋小路などのセンシングによる識別が困難な領域を、走行不可能領域として人手によって環境情報地図に付加した。事前に指定した走行不可能領域周辺のランドマークを2次元測域センサでセンシングしたとき、擬似的なスキャンポイントを



発生させる。ロボットはそれらに対して回避動作をとることで、走行不可能領域を回避する。また、探索対象へのアプローチにおいては、市民との親和性から往来の真中や店舗の入り口など探索対象が明らかに存在しない領域を走行禁止領域として設定し、誤検知による経路の逸脱を抑制した。これらの有効性をつくばチャレンジの実験走行で確認した。

以上の環境情報を提供する環境情報地図に対して、つくばチャレンジにおける一般市街地環境の自律走行によって有効性が確認できた。

## 第8章

つくばチャレンジ 2013 から 2015 までの実験走行より、本研究において構築した自律移動ロボット技術の有効性と課題について考察した。走行可能領域の識別においては、リタイアした事例と完走した事例を比較した。実験走行から、特に縁石や段差などの低所特徴の識別が重要であることを示した。このため、ロボットが走行できない領域(走行不可能領域)を地図で指示することで、センサで識別できない段差に対しても回避が可能であることを示した。

他のロボットとの関係では、正面から接近するロボットに対しては、相互のすれ違いによる回避行動が比較的成功率が高いことを示した。その一方で、側面から接近するロボットに対しては、回避することが難しいことがわかった。これには、著者は相手の動きを予測して、動的に走行可能領域を抽出することが必要であると考えている。

横断歩道手前で、他のロボットにより形成されている待ち行列に加わる動作について、本研究ではロボットが行列のライン上を走行するように走行経路を正確に設定した。しかし、それでも前のロボットの識別に失敗し、回避動作を行ったことがあった。また、行列の途中から割り込んだこともあった。行列動作を確実に実行するには、後ろに並ぶ対象であるロボット、または行列のライン上で動きのある物体を識別する必要があると考えている。

自己位置・姿勢の推定については、公園の円形花壇などランドマークの形状によっては地図とのマッチングが正確にできず、姿勢の推定精度が低下して自己位置・姿勢の推定が破綻する可能性があった。これに対して本研究では歩道と芝生の境界を抽出し、マッチングに用いることで姿勢の推定精度を維持できることを示した。

雨天時の走行については、特に問題となる事象は発生しないことが確認できた。雨天では雨粒が外界センシングにとってランダムなノイズとなり、ロボットの回避行動を誘発し、走行可能領域の逸脱や、自己位置・姿勢の推定を破綻させる原因となる。このため、つくばチャレンジ 2015 では多くのロボットがリタイアとなった。これに対して本研究では走行可能領域から逸脱しない走行制御手法のため、直前で検知した雨粒に対して一時停止を繰り返したが、回避行動をとることはなく、走行経路からの逸脱

はほぼなかった。その結果，ゴールに到達し，課題コースを完走した。以上より，突発的なノイズに対して安定した自律走行が持続できる自律移動ロボット技術を構築できたと考えている。

著者はこれまでのつくばチャレンジの実験走行の結果により，一般市街地における基本的な自律走行は実現できたと考えていること，および今後の課題が，動的な走行可能領域の識別手法の構築であることについて述べた。

## 第9章

本研究のまとめと今後の課題，および展望として本研究による自律移動ロボットの実用化への寄与について述べた。

## 9.2 課題

つくばチャレンジにおいて，一般市街地で安定した自律移動技術が構築できた。一方で，実験走行で抽出され，未だ解決できていない課題がある。それらを以下に示す。

### 移動物体の識別

検知した対象の動きを識別できないため，側方から接近する他のロボットの回避が困難である。相手の動きを予測した回避行動，すなわち動的な走行可能領域の識別が課題である。

### 経路の動的な再設定

コース上の複数の停車車両など，ロボットの進路を測域センサの測距範囲を超えて塞がれた場合，いわゆる袋小路と同様の状態になり，その場での経路変更ができない。コース上の物体を環境情報地図に登録すること，および地図上で局所的な経路の再設定が必要と考える。

## 9.3 展望

著者は本研究で提示した自律移動の3要件について，商品開発においても指針になると考えている。以下，開発のプロダクトを便宜上「ロボット」と表現する。一般的に商品開発では要求仕様とコストを両立させる必要があり，使用目的や環境に対して無駄のない設計が求められる。そのため，研究の段階では汎用性を重視し，多様な機能を持たせる設計をする。一方，商品開発の段階では目的に対して有効性の低い機能は取り除かれ，最終的にコストを成立させる必要最小限の構成となる。この商品企画において，本研究で示した3要件を基準としてロボットの仕様を検討し，設計することが工数の削減に効果的であると考え。以下に示す具体的な例に対して，本研究を適用した場合の効果を述べる。

### 1. 自動運転車

自動運転車の開発では、近い将来一般道路まで対象範囲を拡大することが検討されている。本研究における自律移動ロボットの技術は、市街地の局所的な動作の精度および安全性の向上に有効であると著者は考えている。例として、街中の路地裏など車道と歩道の境界があいまいな狭い道がある。このような場所では歩行者と自動車が混在して走行する状況が発生する。自動車は低速で走行すること、および回避行動を行うことから、つくばチャレンジの状況と類似している。したがって、本研究において歩行者との親和性を維持するように走行制御を構築した知見が有用である。また、著者は回避などの局所的な動作には、安全性の観点から歩道の境界を識別することが必要と考えるが、これには本研究で構築した走行可能領域の識別手法が有効である。このように、つくばチャレンジで構築した技術は自動運転車に対して多くの用途に応用が期待できる。

### 2. パーソナルモビリティ

パーソナルモビリティは超小型モビリティ<sup>1)</sup>とも呼ばれ、軽自動車よりもさらに小型で、セニアカートよりも乗員数が多く速度が高い。その導入・普及により、CO<sub>2</sub>の削減のみならず、観光・地域振興、都市や地域の新たな交通手段、高齢者や子育て世代の移動支援等の多くの副次的便益が期待される。パーソナルモビリティは都市部のみならず、住宅地の生活道路のような環境での使用が検討されているが、生活道路では通学路など歩行者との距離が近い。そのため、十分な安全への配慮が必要であり、いわゆる「予防安全技術」を実装することが必要となる。このパーソナルモビリティの予防安全技術の開発に対して、著者は本研究で構築した走行可能領域の識別、および走行制御手法が有効と考える。さらに、法律が適合すれば本研究で構築した手法による自律走行も可能である。

### 3. サービスロボット

ロボットによるサービスタスクは、移動そのものによって達成できる作業が、ロボットのへの実装が比較的容易である。このようなサービスロボットとして「ロボット芝刈り機」がある。これは屋外の掃除ロボットに類する商品であり、欧州で需要が高まっている。ロボット芝刈り機は、ロボット掃除機と同様に領域内を塗りつぶすように走行することで芝を刈る。多くの商品では、ロボットが芝を刈る領域は、使用者が事前に鋼線で囲むことによって設定する。鋼線には微弱電流が流されており、ロボットは鋼線を検知することで、鋼線から先に出ないように進路を変更する。また、領域内の樹木や物置などの物体は接触することで検知するため、ロボットが接触することで傷ついてしまう物や樹木は、その下部および根元を保護しておくことが使用者に求めら

<sup>1)</sup>国交省自動車局は「自動車よりコンパクトで小回りが利き、環境性能に優れ、地域の手軽な移動の足となる1人～2人乗り程度の車両」と定義している。

れる．このようにロボット芝刈り機を働かせるためには，事前に環境を整備しておく必要がある．ロボット芝刈り機の商品価値向上には，人の手を借りることなくロボットが芝を刈る領域を識別して動作することが必要になるが，これにはつくばチャレンジの知見および自律移動ロボットの技術が役立つと考えられる．ただし実際のコストと商品としての販売価格を考えた場合，つくばチャレンジの自律移動ロボットに用いられている高価なセンサやデバイスを適用することは難しい．したがって，コストに適したデバイスで実現できるように環境条件を定義し，本研究において提示した自律移動ロボットの3要件を満たすように設計・開発を行うことが有効であると考えられる．

自律移動ロボット技術を実装した商品が普及することにより，多様なサービスを提供できるようになる．それによって社会で働く人々に時間的な余裕を作り出すことができ，ワークライフバランスがとれた豊かな生活を送ることができるようになることが期待できる．また，自身での移動が難しい人々にもパーソナルモビリティのような移動手段を提供できるため，より多くの人々が豊かな生活を送れるようになると期待できる．このような社会の実現に本研究が貢献できることを願って，本論文のむすびとする．

# 付 録 A

## つくばチャレンジ

### (Real World Robot Challenge)

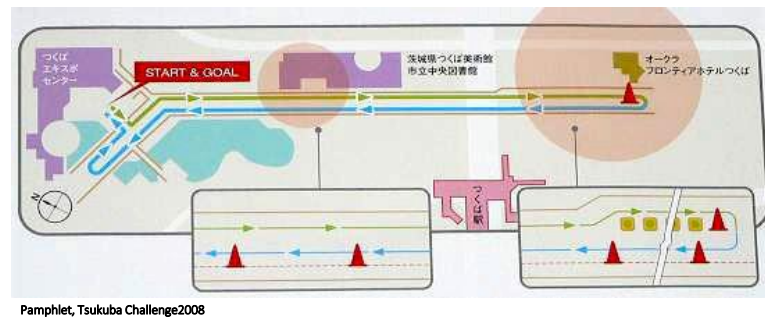
#### A.1 つくばチャレンジ 2007 から 2011

最初に開催されたつくばチャレンジ 2007(図 A.1)では、課題コースは直線として設定された。ロボットは道なりに走行することでゴールに到達することが可能であった。図 A.2 に示す 2008 では折返しのあるコースになり、折返し地点を通過するために正確な自己位置・姿勢の推定が必要になった。この年の自己位置・姿勢の推定に多く用いられた手法は GPS とオドメトリであった。図 A.3 に示す 2009 では一般の歩道、および樹木に囲まれた公園内の曲線形状の遊歩道を含むコースになった。2010 では人通りの多いつくばセンターがコースに含まれたため、ロボットは歩行者に対して、より精度の高い動作が必要になった(図 A.4)。さらにゴールが建物の中に設定されたため、その入口に到達するための高精度な自己位置・姿勢の推定が必要になった。この年以降、占有格子地図と 2 次元測域センサのスキャンデータのマッチングによる自己位置・姿勢の推定が多く用いられるようになった。また安全のため、人通りの多い通りにロボットが進入する直前に一時停止位置が設けられた。2011 ではエレベータの利用が課題として設定された(図 A.5)。この年でつくばチャレンジは一旦終了した。2012 は 2011 と同一課題の、エキシビションとしてのイベントであった。



図 A.1 つくばチャレンジ 2007

## A.1 つくばチャレンジ 2007 から 2011



Pamphlet, Tsukuba Challenge2008

図 A.2 つくばチャレンジ 2008



図 A.3 つくばチャレンジ 2009

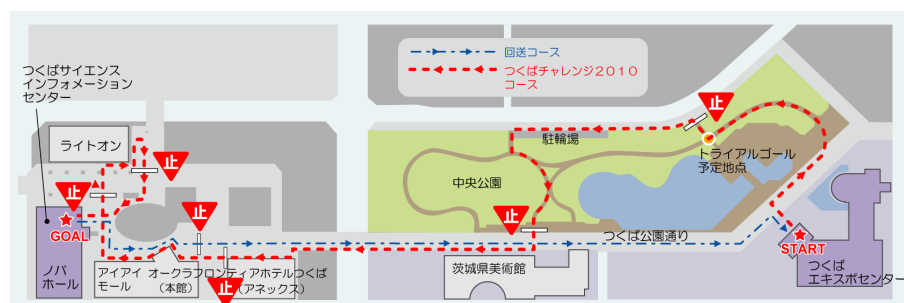


図 A.4 つくばチャレンジ 2010





図 A.5 つくばチャレンジ 2011,2012

## A.2 つくばチャレンジ 2013 以降

2013 年に、つくばチャレンジが再開された(図 A.6)。このつくばチャレンジ 2013 より、人物探索の課題が設定された。つくばチャレンジ 2014 の課題コースを図 A.7 に示す<sup>1)</sup>。この各区間の特徴は下記のとおりである。

### (1) スタート地点付近: GPS の精度低下

ロボットの左側に高い植栽とマンションがあり、GPS 測位において、GPS 衛星からの電波が建物に反射することによって生じる、いわゆる「マルチパス」と呼ばれる GPS 測位の精度低下が発生する。これは高い建物に囲まれた場所で頻繁に発生する問題である。一般市街地での GPS の使用では常に測位精度を評価し、精度が低下した測位データを棄却する必要がある。

### (2) 公園内遊歩道の開けた場所: ランドマークが少ない

この区間はランドマークが少ないため、ランドマークを用いた自己位置・姿勢の推定の安定性が低下する。一般市街地においても広場などでは測距範囲内にランドマークがないことがある。

### (3) 公園: 歩道の境界が不明確

芝生によって歩道の境界が明確でない区間では自己位置・姿勢の推定誤差、および回避動作などでロボットが経路を逸脱し、芝生に入り込む可能性がある。一般市街地でもこのような歩道の境界が明確でない場所は多く存在する。

<sup>1)</sup>つくばチャレンジ 2013 と 2014 の課題コースは、ほぼ同じ区間であった。

#### (4) 遊歩道：歩行者・自転車の通行量が多い

遊歩道では歩行者と自転車の通行が多いため、特に安全に配慮する必要がある。ロボットが市街地を走行する場合、向かってくる歩行者の回避などで急な動作をとると、ロボットに慣れない歩行者を驚かせ、恐怖感を与える可能性がある。ゆえにロボットには歩行者や自転車の安全を脅かさない走行が求められる。

#### (5) つくばセンター 1：探索対象へのアプローチ

つくばセンターは、つくばチャレンジ 2014 と 2015 では対象人物を探索し、ロボットが自律的に経路を設定してアプローチする領域である。ランドマークとなる建物があり、センシングが難しい背の低い物体や複雑な形状の物体が存在しないため、比較的走行が容易な領域である。一方で、商業活動が活発であり、路上には看板や自転車など多様な物が置かれるため、ロボットはそれらを回避する必要がある。

#### (6) つくばセンター 2：段差・縁石の回避

この領域では街路樹とそれを保護する低い縁石が存在する。そのため歩行者の移動方向などの条件が複合した場合にロボットが回避行動によってコースを逸脱し、それらに接触する可能性がある。

#### (7) つくばセンター遊歩道：変化する環境

休日には出店の看板や歩行者が増えるため、ロボットには交通流に沿った自律走行が求められる。この区間においても街路樹とその周囲の低い縁石が存在する。このように一般市街地には歩道と店舗などの領域を区別するために縁石が多く用いられている。したがって、縁石の識別は市街地の走行において重要な課題である。

#### (8) ゴール

つくばチャレンジ 2014 では、コースの全長は探索行動による走行距離を除いて約 1.43[km] である。走行距離が長くなるほどリタイアのリスクが高くなる。



※ 第3探索エリアの芝生・植え込みエリアは除きます。

— 探索エリアの出入口

図 A.6 つくばチャレンジ 2013



図 A.7 つくばチャレンジ 2014 の課題コース

## 付 録 B

### DGPS 高精度測位点の抽出による ジャイロの補正

DGPS 高精度測位点の抽出過程でジャイロの累積誤差を補正することができる。著者は最初にジャイロの補正によって走行軌跡を補正する手法を検討した。DGPS 測位の精度評価手法を図 B.1 を用いて説明する。 ${}^p\theta_{T_k}$  は DGPS の測位誤差が小さいほど姿勢の真値に近くなる。一方、ジャイロによる姿勢の計測値  ${}^g\theta_{T_k}$  には累積誤差が含まれる。そのため、(B.1) 式に示す  ${}^p\theta_{T_k}$  と  ${}^g\theta_{T_k}$  の差  ${}^o\theta_{T_k}$  が、DGPS の測位誤差が小さいほど図 B.1 の時刻  $T_{n-3}$  から  $T_n$  に示すようにジャイロの累積誤差に近づき、ばらつきが小さくなる。したがって、 ${}^o\theta_{T_k}$  の標準偏差  $\sigma_{o\theta_{T_k}}$  によって DGPS の測位精度を評価することができる。一般的に標準偏差はサンプルの母数に影響されるため、逐次算出される  ${}^o\theta_{T_k}$  を一定数蓄積し、常に母数をあらかじめ設定した数にして  $\sigma_{o\theta_{T_k}}$  を求める。母数が大きくなるほど  $\sigma_{o\theta_{T_k}}$  におけるデータの外れ値の寄与が小さくなり、精度評価が難しくなることから、蓄積する  ${}^o\theta_{T_k}$  の数を比較的少ない 5 個に設定した。

DGPS 高精度測位点の抽出において、 $\sigma_{o\theta_{T_k}}$  が時刻  $T_n$  で図 B.1 の “Standard Deviation” に示すとおりしきい値以下になったとき、DGPS の測位誤差が十分に小さいと判別する。また、本研究では DGPS 高精度測位点を用いてパーティクルフィルタによって確率的に走行軌跡を推定するため、より多くの高精度測位点を抽出することが望ましい。したがって、精度評価に若干の余裕を持たせることとし、 $\sigma_{o\theta_{T_k}}$  のしきい値を 2.5[deg] に設定した。この時刻  $T_n$  までの近似直線の傾き角度の平均値  ${}^p\bar{\theta}_{T_n}$  をロボットの姿勢の近似値とし、このときの DGPS 測位点 ( ${}^px_{T_n}, {}^py_{T_n}, {}^p\bar{\theta}_{T_n}$ ) を高精度測位点とする。また、コースにおいて高精度測位点が偏らないようにするため、高精度測位点を抽出した後、蓄積したデータを消去して新たに統計処理を行うこととした。

占有格子地図作成のため、宇都宮大学工学部に設定した全周約 500[m] の評価コースにおいて DGPS 測位点、2 次元測域センサデータとジャイロオドメトリデータを取得した。図 B.2 に、DGPS 測位点の評価結果を示す。図中の円の半径が、先述の DGPS 測位点列から推定した、ジャイロの累積誤差の標準偏差の大きさを示す。図 B.2 において、特に DGPS 高精度測位点 2 から 3 の間の標準偏差が大きい。これは建物の近傍を通過するため、主にマルチパスが原因であると考えられる。一方で、直線近似が比較的容易な区間では標準偏差が小さくなっており、高精度測位点を抽出することができた。DGPS 測位点の軌跡から推定したジャイロの累積誤差を図 B.3(a) に示す。標準偏差のしきい値に設定した 2.5[deg] 程度のばらつきで誤差が推定できている。しかしながらジャイロの補正のみでは、その補正地点以前の姿勢の誤差を補正できないため、正確な走行軌跡を推定することはできない。ジャイロ



の補正による走行軌跡から作成した占有格子地図を図 B.3(b) に示す．補正地点でロボットの方向が修正できているが，それまでの誤差によって地図の形状に歪みが生じている．

$${}_o\theta_{T_k} = |{}_p\theta_{T_k} - {}_g\theta_{T_k}| \quad (\text{B.1})$$

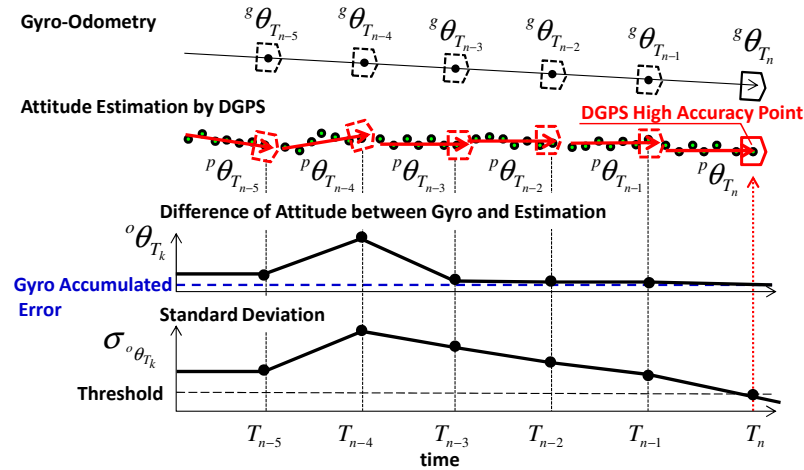
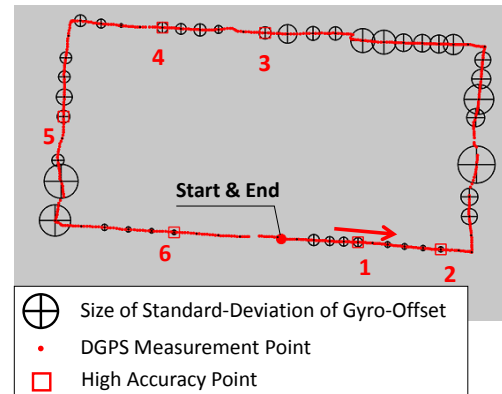


図 B.1 DGPS 測位によるジャイロの補正

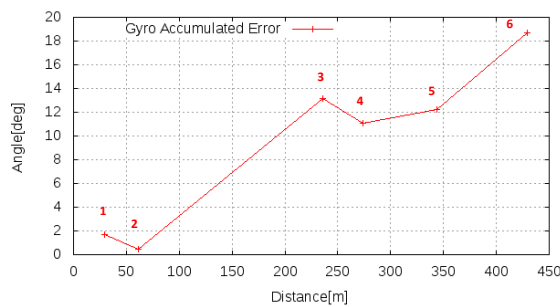


(a) Course in Utsunomiya University

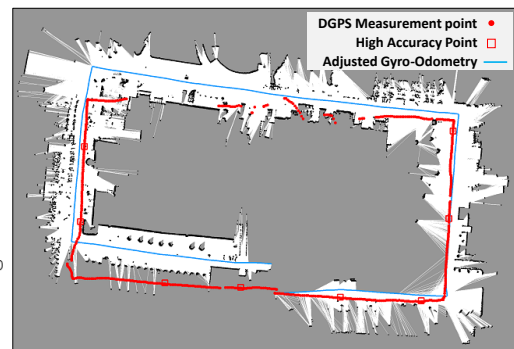


(b) Gyro-Offset Adjustment by DGPS High Accuracy point

図 B.2 DGPS 測位の精度評価



(a) Gyro Adjustment



(b) Grid map generated by adjusted gyro odometry

図 B.3 ジャイロの累積誤差の推定結果と，補正した走行軌跡による占有格子地図

## 参考文献

- [1] 石川 和良, 青山 元, 関 淳也, 岡村 三男, 石村 左緒里, 尾崎 功一, 横田 和隆, 山本 純雄: “屋外清掃ロボットの実用化”, 日本ロボット学会誌, vol. 25, no. 6, pp. 802-812, 2007.
- [2] 袴田 和則, 金本 准一, 堀井 浩司, 菅原 雄介, 有木 孝夫: “自律移動型ロボットの警備分野への応用”, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol. 1, pp. 143- 144, 1996.
- [3] 三澤 正志, 吉田 智章, 油田 信一: “自律的帰還機能を持つ荷物運搬用電動台車の開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 25, no. 8, pp. 1199-1206, 2007.
- [4] 原 祥堯, 川田 浩彦, 大矢 晃久, 油田 信一: “測域センサの受光強度付きスキャンデータを用いた移動ロボットのための環境マップ構築”, 第 12 回ロボティクスシンポジア 予稿集 (2007), pp. 480-485, 2007.
- [5] iRobot Roomba.  
<http://www.irobot-jp.com/index.html>
- [6] M Martin Buehler, Karl Iagnemma, and Sanjiv Singh: “The DARPA Urban Challenge”, *Springer*, 2010.
- [7] 内閣府 SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 自動走行システム研究開発計画.  
[http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6\\_jidousoukou.pdf](http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/6_jidousoukou.pdf)
- [8] 前山 祥一, 大矢 晃久, 油田 信一: “移動ロボットのための遡及的現在位置推定法 –処理時間を要する外界センサデータの利用–”, 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 7, pp. 115-121, 1997.
- [9] R.L.French: “Map matching origins, approaches and applications”, *2nd Int. Symp. Land Vehicle Navigation*, Munster, Germany, 1989.
- [10] 三藤 邦彦, 天目 健二, 土居 陽一, 清水 修: “自動車の自立航法装置の開発”, 電子情報通信学会 SANE87-47, 1987.
- [11] Michael Montemerlo, and Sebastian Thrun: “Simultaneous Localization and Mapping with Unknown Data Association Using FastSLAM”, *In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2002.



- [12] Austin Eliazar, and Ronald Parr: “DP-SLAM: Fast, Robust Simultaneous Localization and Mapping Without Predetermined Landmarks”, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1314-1320, 2004.
- [13] Tom Duckett: “A Genetic Algorithm for Simultaneous Localization and Mapping”, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 434-439, 2003.
- [14] 油田 信一, 水川 真, 橋本 秀記: “つくばチャレンジのねらいと成果”, *Jornal of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. 49, no. 9, pp. 572-578, 2010.
- [15] Shin’ichi Yuta, Makoto Mizukawa, Hideki Hashimoto, Hirofumi Tashiro, and Tsuyoshi Okubo: “An Open Experiment of Mobile Robot Autonomous Navigation at the Pedestrian Streets in the City –Tsukuba Challenge–”, *IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation*, pp. 904-909, 2011.
- [16] 吉田 庄三, 江原 雅人, 黒田 幸男: “ディーゼルエンジンのモデルベース適合への境界把握手法の適用”, *自動車技術会論文集*, vol. 43 no. 2, pp. 479-484, 2012.
- [17] 永谷 圭司, 油田 信一: “タスクオリエンテッドアプローチによる自律移動マニピュレータの研究 –ドアの通り抜けを含む屋内の自律走行の実現–”, *日本ロボット学会誌*, vol. 17, no. 6, pp. 111-121, 1999.
- [18] Tetsuo Tomizawa, Akihisa Ohya, and Shin’ichi Yuta: “Remote Book Browsing System using a Mobile Manipulator”, *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 256-261, 2003.
- [19] 羽田 靖史, 油田 信一: “オドメトリと超音波センサと地図を用いた屋内移動車用ポジショニングシステム (超音波センサシミュレータによる反射物体の識別)”, *日本機械学会論文集 (C編)*, vol. 672, no. 68, pp. 62-69, 2002.
- [20] つくば市 つくばチャレンジ.  
<http://www.tsukubachallenge.jp/>
- [21] ニューテクノロジー財団 つくばチャレンジ.  
<http://www.ntf.or.jp/challenge/>
- [22] 米田 圭佑, 有松 和之, レイノルズ ジェームズ 俊介, 菅原 英剛, 山口 直輝, 飯田 翔太郎, 佐藤 高志, 高橋 裕己, 木村 洋介: “市街地環境で動作する自律移動ロボットの開発”, *計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 SI2015, 1K4-7*, 2015.

- [23] Richard Welch, Daniel Limonadi, and Robert Manning: “Systems Engineering the Curiosity Rover: A Retrospective”, *Proc. of the 8th International Conference on System of Systems Engineering*, 2013.
- [24] Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu, and Shin’ichi Yuta: “Differential GPS and odometry-based outdoor navigation of a mobile robot”, *Advanced robotics*, vol. 18, no. 6, pp. 611-635, 2004.
- [25] Masataka Suzuki, Teppei Saitoh, Eisuke Terada, and Yoji Kuroda: “Near-To-Far Self-Supervised Road Estimation for Complicated Environments”, *5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems*, 2010.
- [26] Takashi Suzuki, Nobuaki Kubo, and Akio Yasuda: “The Possibility of the Precise Positioning and Multipath Error Mitigation in the Real-time”, *The 2004 Int. Symposium on GNSS/GPS*, 2004.
- [27] Taro Suzuki, Mitsunori Kitamura, Yoshiharu Amano, and Nobuaki Kubo: “Autonomous Navigation of a Mobile Robot Based on GNSS/DR Integration in Outdoor Environments”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 2, pp. 214-224, 2014.
- [28] Eijiro Takeuchi, Masashi Yamazaki, Kazunori Ohno, and Satoshi Tadokoro: “GPS Measurement Model with Satellite Visibility using 3D Map for Particle Filter”, *2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2011)*, 2011.
- [29] 山崎 将史, 竹内 栄次郎, 大野 和則, 田所 諭: “三次元地形情報および GPS を用いたパーティクルフィルタによるマルチパスを考慮した自己位置推定”, *日本ロボット学会誌*, vol. 29, no. 8, pp. 702-709, 2011.
- [30] Mitsunori Kitamura, Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume: “Improvement of GPS and GLONASS Positioning Accuracy by Multipath Mitigation Using Omnidirectional Infrared Camera”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 23, no. 6, pp. 1125-1131, 2011.
- [31] Masashi Yokozuka, Yusuke Suzuki, Toshinobu Takei, Noriaki Hashimoto, and Osamu Matsumoto: “Auxiliary Particle Filter Localization for Intelligent Wheelchair Systems in Urban Environments”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.22, no.6, pp. 758-765, 2010.

- [32] Masashi Yokozuka, and Osamu Matsumoto: “Sub-Map Dividing and Realignment FastSLAM by Blocking Gibbs MCEM for Large-Scale 3-D Grid Mapping”, *Advanced robotics*, vol.26, no. 14, pp. 1649-1675, 2012.
- [33] Sam Ann Rahok, Hirohisa Oneda, Akio Tanaka, and Koichi Ozaki: “A Robust Navigation Method for Mobile Robots in Real-World Environments”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26 no. 2, pp. 177-184, 2014.
- [34] Naoki Akai, Kazumichi Inoue, and Koichi Ozaki: “Autonomous Navigation Based on Magnetic and Geometric Landmarks on Environmental Structure in Real World”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 2, pp. 158-165, 2014.
- [35] Fumitaka Hashikawa, and Kazuyuki Morioka: “Convenient Position Estimation of Distributed Sensors in Intelligent Spaces Using SLAM for Mobile Robots”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 27, no. 2, pp. 191-199, 2015.
- [36] Masatoshi Nomatsu, Youhei Suganuma, Yosuke Yui, and Yutaka Uchimura: “Development of an Autonomous Mobile Robot with Self-Localization and Searching Target in a Real Environment”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 27 no. 4, pp. 356-364, 2015.
- [37] Toshiaki Shioya, Kazushige Kogure, and Naoya Ohta: “Minimal Autonomous Mover - MG-11 for Tsukuba Challenge -”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 2, pp. 225-235, 2014.
- [38] 吉田 智章, 入江 清, 小柳 栄次, 友納 正裕: “3D スキャナとジャイロを用いた屋外ナビゲーションプラットフォーム”, 計測自動制御学会論文集, vol. 47, no. 10, pp. 493-500, 2011.
- [39] Tetsuo Tomizawa, Satoshi Muramatsu, Masanori Sato, Masataka Hirai, Shunsuke Kudoh, and Takashi Suehiro: “Development of an Intelligent Senior-Car in a Pedestrian Walkway”, *Advanced robotics*, vol. 26, no. 14, pp. 1577-1602, 2012.
- [40] Satoshi Muramatsu, Tetsuo Tomizawa, Shunsuke Kudoh, and Takashi Suehiro: “Development of Intelligent Mobile Cart in a Crowded Environment – Robust Localization Technique with Unknown Objects –”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 2, pp. 204-213, 2014.
- [41] 伊達 央, 滝田 好宏: “自律移動ロボット Smart Dump による実世界環境走行実験”, 日本ロボット学会誌, vol. 30, no. 3, pp. 305-313, 2012.

- [42] 山田 大地, 石田 卓也, 関口 誠, 岡村 公望, 福永 和海, 大矢 晃久: “高所特徴による自己位置推定を用いた明示的な動作計画に基づく屋外自律ナビゲーション”, 日本ロボット学会誌, vol. 30, no. 3, pp. 253-261, 2012.
- [43] 大島 章: “移動ロボットによる測域センサを用いたセンサベースナビゲーション”, つくばチャレンジシンポジウム 2007, no. 03, 2007.
- [44] 渡辺 敦志, 阪東 茂, 品田 和洋, 油田 信一: “方位検出と交差点認識を用いた道なり走行ベースの屋外自律ナビゲーション”, 日本ロボット学会誌, vol. 30, no. 3, pp. 271-279, 2012.
- [45] Masanobu Saito, Kentaro Kiuchi, Shogo Shimizu, Takayuki Yokota, Yusuke Fujino, Takato Saito, and Yoji Kuroda: “Pre-Driving Needless System for Autonomous Mobile Robots Navigation in Real World Robot Challenge 2013”, *Journal of robotics and mechatronics*, vol. 26, no. 2, pp. 185-195, 2014.
- [46] 江口 純司, 尾崎 功一: “DGPS を用いて設定したウェイポイント経路追従による実環境自律移動法の開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 30, no. 3, pp. 314-323, 2012.
- [47] Katsumi Kimoto, Norihiro Asada, Takayoshi Mori, Yoshitaka Hara, Akihisa Ohya, and Shin'ichi Yuta: “Development of Small Size 3D LIDAR”, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014.
- [48] Eijiro Takeuchi, Takashi Tsubouchi, and Shin'ichi Yuta: “Integration and Synchronization of External Sensor Data for a Mobile Robot”, *2003 SICE Annual Conference*, pp.2620-2625, 2003.
- [49] 関 淳也, 青山 元, 石川 和良, 石村 左緒里, 和田迫 鉄矢, 足立 佳儀, 薩見 雄一, 横田 和隆, 尾崎 功一, 山本 純雄: “視覚によるライン・トレースと磁気タグの併用による走行制御を用いた搬送ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 27, no. 8, pp. 27-8, 2009.
- [50] Masashi Yokozuka, and Osamu Matsumoto: “Accurate Localization for Making Maps to Mobile Robots Using Odometry and GPS Without Scan-Matching”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 27, no. 4, pp. 410-418, 2015.
- [51] 原 祥堯, 川田 浩彦, 大矢 晃久, 油田 信一: “測域センサの受光強度付きスキャンデータを用いた移動ロボットのための環境マップ構築”, 第 12 回ロボティクスシンポジア 予稿集 (2007), pp. 480-485, 2007.
- [52] Naoki Akai, Kenji Yamauchi, Kazumichi Inoue, Yasunari Kakigi, Yuki Abe, and Koichi Ozaki: “Development of Mobile Robot “SARA” that Completed Mission in

- Real World Robot Challenge 2014”, *Journal of robotics and mechatronics*, vol. 27, no. 4, pp. 327-336, 2015.
- [53] Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller, and Ben Wegbreit: “Fast-SLAM: A factored solution to simultaneous mapping and localization”, *in: Proc. National Conf. on Artificial Intelligence(AAAI)*, pp. 593-598, 2002.
- [54] Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, Daphne Koller, and Ben Wegbreit: “Fast-SLAM2.0: An Improved Particle Filtering Algorithm for Simultaneous Localization and Mapping that Provably Converges”, *Proc. of Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pp. 1151-1156, 2003.
- [55] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox: “Probabilistic Robotics”, *The MIT Press*, 2005.
- [56] 原 祥堯, 坪内 孝司, 大島 章: “蓄積したスキャン形状のマッチングにより過去を考慮した Grid-based SLAM”, 第 20 回ロボティクスシンポジア, 1B4, 2015.
- [57] 伊達 央, 滝田 好宏, ブイ・クワン・ズン: “自律移動ロボット Smart Dump 4 による環境認識と自己位置推定”, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 SI2010, 3A1-3, 2010.
- [58] Yoichi Morales, Eijiro Takeuchi, and Takashi Tsubouchi: “Vehicle Localization in Outdoor Woodland Environment with sensor fault detection” ,*it Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.449-454, 2008.
- [59] 平井 有三: 視覚と記憶の情報処理, 培風館, ISBN4-563-01386-2, pp. 192-199, 1995,
- [60] 入江 清, 吉田 智章, 小柳 栄次, 友納 正裕: “ジャイロオドメトリと 3D レーザースキャナによるジャイロのドリフト誤差を考慮した自己位置推定法”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010(2010), 1A1-E01, 2010.
- [61] 江口 純司, 尾崎 功一: “DGPS 測位点の精度評価に基づく占有格子地図の作成手法の構築”, 日本機械学会論文集 (C 編) , vol. 78, no. 794 , pp. 3459-3468, 2012.
- [62] 関 晃仁, 奥富 正敏: “平面の検出・姿勢推定を利用した一般道路環境下におけるロバストな障害物検出”, 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J89-D, no.8, pp. 1859-1868, 2006.
- [63] Kiyoshi Irie, Tomoaki Yoshida, and Masahiro Tomono: “Outdoor Localization Using Stereo Vision Under Various Illumination Conditions”, *Advanced Robotics*, vol. 26, pp. 327-348, 2012.

- [64] 岩田 啓明, 実吉 敬二: “ステレオカメラによるビジュアルオドメトリおよび自己位置認識”, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 SI2010, 3N2-5, 2010.
- [65] Keita Kurashiki, Mareus Aguilar, and Sakon Soontornvanichkit: “Visual Navigation of a Wheeled Mobile Robot Using Front Image in Semi-Structured Environment”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 27, no. 4, pp. 392-400, 2015.
- [66] 奥富 正敏, 野口 卓, 中野 勝之: “ステレオ画像からの射影変換行列の抽出による道路領域検出”, 日本ロボット学会誌, vol. 18, no. 8, pp. 1105-1111, 2000.
- [67] Kazuya Okawa: “Three Tiered Self-Localization of Two Position Estimation Using Three Dimensional Environment Map and Gyro-Odometry”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 2, pp. 196-203, 2014.
- [68] Teppei Saitoh, and Yoji Kuroda: “Online Road Surface Analysis using Laser Return Value in Urban Environments”, *In Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2010.
- [69] Velodyne HDL-32e.  
<http://www.argocorp.com/cam/special/Velodyne/HDL-32e.html>
- [70] 三次元測域センサ仕様書, 北陽電機, 2014.
- [71] Yisuke Fujino, Kentaro Kiuchi, Shogo Shimizu, Takayuki Yokota, and Yoji Kuroda: “Integrated Autonomous Navigation System and Automatic Large Scale Three Dimensional Map Construction”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 27, no. 4, pp. 401-409, 2015.
- [72] Junji Eguchi, and Koichi Ozaki: “Development of Making Method of Occupancy Grid Map for Localization by Combination with DGPS and Scan Matching”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 25, no. 3, 2013.
- [73] Junji Eguchi, and Koichi Ozaki: “Development of the Autonomous Mobile Robot for Target-Searching in Urban Areas in the Tsukuba Challenge 2013”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 26, no. 2, pp. 166-176, 2014.
- [74] 大川 真弥, 滝田 好宏, 伊達 央: “刈払ロボットのための LIDAR の受光強度情報を用いた植生に含まれる石質障害物の検出手法”, 日本機械学会論文集, vol. 80, no. 819, 2014.
- [75] Sam Ann Rahok, Kazumichi Inoue and Koichi Ozaki: “Development of a Mobile Robot to Run in Tsukuba Challenge 2010”, *Advanced robotics*, vol. 26, no. 14, pp. 1555-1575, 2012.



- [76] 細田 祐司, 山本 健次郎, 一野瀬 亮子. 柄川 索, 玉本 淳一, 坪内 孝司: “人間共生ボットの衝突回避制御”, 日本機械学会論文集 (C編), vol. 77, no. 775, pp. 484-494, 2011.
- [77] Shigeki Iida, and Shin'ichi Yuta: “Vehicle Command System and Trajectory Control for Autonomous Mobile Robots”, *Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and System (IROS ' 91)*, vol. 1, pp. 212-217, 1991.
- [78] Pamela I Labuhn, and William J Chundrlik Jr: “Adaptive cruise control”, *U.S. Patent*, no. 5, pp. 454-442, 1995.
- [79] Shinya Ohkawa, Yoshihiro Takita, Hisashi Date and Kazuhiro Kobayashi: “Development of Autonomous Mobile Robot Using Articulated Steering Vehicle and Lateral Guiding Method”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.27, no.4, pp. 337-345, 2015.

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、ご指導ご鞭撻を賜りました宇都宮大学大学院 尾崎功一教授に心から感謝いたします。長い研究生活の間、先生からいただいた暖かいご助言、および適切なご指導により、本研究を完成することができました。また、本研究をまとめるにあたり、貴重な御助言を賜りました宇都宮大学大学院 横田和隆教授，星野智史准教授，高山善匡教授に深く感謝いたします。嶋脇聡准教授には本研究への御助言，ならびに副専門の履修においてご指導いただきました。深く感謝いたします。芝浦工業大学 油田信一教授はつくばチャレンジを提案され，これまで実行委員長を務められました。つくばチャレンジによって本研究が始まり，完成できたこと，そして本研究に御助言をいただいたことに深く感謝いたします。また，つくばチャレンジにおいてロボットの実験走行を行う上で安全責任者を引き受けていただいた宇都宮大学大学院 尾崎研究室の博士前期課程 柿木泰成氏，平成 24 年度博士前期課程修了生 島田遼氏に深く感謝いたします。また，ロボットの 3 次元測域センサをモニタ提供していただいた北陽電機株式会社様に感謝いたします。また，公私に渡り幅広い御助言，ご協力をいただきました尾崎研究室の学生，卒業生の皆様に感謝いたします。最後に私の研究生活を幅広く支えていただき，毎日忙しい中，お弁当を作ってくれた妻 美奈子，就寝前に「パパがんばって」と応援してくれた息子 翔馬，母 江口 美由紀，妹 江口 陽子に深く感謝の意を表して結びといたします。